



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I**



“EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON BASE A SU ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA EN LA CARRETERA TAPANATEPEC – TALISMÁN, TRAMO TAPACHULA – TALISMÁN DEL ESTADO DE CHIAPAS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

GALO RODRIGUEZ GUILLEN C130175

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. MANUEL ALEJANDRO BUSTAMANTE VEGA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS A 26 DE MARZO DE 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA C-I



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
 15 de abril del 2024
 Oficio No. F.I.01.671/2024

C. GALO RODRÍGUEZ GUILLÉN
EGRESADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN CONSTRUCCIÓN
PRESENTE.

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

“EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON BASE A SU ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA EN LA CARRETERA TAPANATEPEC - TALISMÁN, TRAMO TAPACHULA - TALISMÁN DEL ESTADO DE CHIAPAS”.

CERTIFICO el VOTO APROBATORIO emitido por este jurado, y autorizo la entrega de tesis digital elaborada a través del Programa Institucional para la Obtención del Grado Académico (PIGA), para que sea sustentado en su Examen de grado de Maestro en Ingeniería con Formación en Construcción.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”

DR. OMAR ANTONIO DE LA CRUZ COURTOIS
DIRECTOR



Ccp. Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería, Campus I. UNACH.
 Archivo/minutario
 OACC/HMSG/tcpg*





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
 SECRETARÍA ACADÉMICA
 COORDINACIÓN DE BIBLIOTECAS UNIVERSITARIAS



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Galo Rodríguez Guillen,
 Autor (a) de la tesis bajo el título de "Evaluación de la Mezcla Asfáltica en Caliente con Base a su Estructura Granulométrica en la Carretera Tapachula - Talismán, Tramo Tapachula - Talismán del Estado de Chiapas" presentada y aprobada en el año 2024 como requisito para obtener el título o grado de Maestría en Ingeniería con Formación en Construcción, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 19 días del mes de Abril del año 2024.

Galo Rodríguez Guillen

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Agradecimientos

Agradezco a todas y cada una de las personas que estuvieron en este camino e influir en mi formación profesional.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), por la oportunidad de realizar este taller para titulación y seguir brindando más oportunidades.

Agradezco a la empresa SELYCC, S.A DE C.V. y a su personal por brindarme el apoyo para la realización de los ensayos que necesitaba en este proyecto.

Agradezco el apoyo y orientación del área de posgrado de la UNACH.

Agradezco el apoyo de mi director de tesis M.I. Manuel Alejandro Bustamante Vega y a mis asesores.

Dedicatorias

A DIOS y San Judas Tadeo por no dejarme flaquear en momentos difíciles, por la bendición de tener salud y ser mi guía en este camino para poder concluir mi maestría.

A mi madre Avidail Guillen Aguilar, un ejemplo de lucha y perseverancia, gracias por tu ejemplo y tu fortaleza, gracias por el gran apoyo y por creer siempre en mí y en mis sueños, te amo mamita, gracias por esas palabras que siempre me diste en esos momentos que siempre los necesitaba y por estar conmigo siempre.

A mis hermanos Edgar, Iván y Alexander Rodríguez Guillen, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional.

A mi abuelita María Consuelo Aguilar Vidal, que siempre quise mucho y que, aunque no esté entre nosotros la quiero y extraño.

A mi papá (abuelito) Óscar Guillen Cancino, a quien admiro por esa gran fortaleza que aún tiene, él, que ha sido un padre para mí y quien es mi ejemplo de valentía, perseverancia y amor.

A mi gran amiga, Jacqueline López Díaz, por todo su apoyo incondicional y por siempre motivarme a seguir adelante.

Índice General

Resumen.....	9
Introducción	10
Marco Teórico.....	15
1.1 Antecedentes.	15
1.2 Marco Conceptual.	21
1.2.1 Caracterización de los materiales pétreos.	21
1.2.1.1 Granulometría.	22
1.2.1.2 Densidad relativa.....	23
1.2.1.3 Desgaste de los ángeles.....	23
1.2.1.4 Desgaste Microdeval.	23
1.2.1.5 Intemperismo acelerado.	23
1.2.1.6 Partículas alargadas y lajeadas.	24
1.2.1.7 Partículas trituradas.	24
1.2.1.8 Desprendimiento por fricción.	24
1.2.1.9 Angularidad.	24
1.2.1.10 Equivalente de arena.....	25
1.2.1.11 Azul de metileno.....	25
1.2.2 Caracterización de material asfáltico.	25
1.2.3 Tipos de mezclas asfálticas.	27
1.2.4 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.....	28
1.2.5 Diagrama de fases en mezclas asfálticas.....	31
1.2.6 Características de la mezcla asfáltica en caliente.....	33
1.2.4 Línea Teórica.....	35
Metodología.....	36
2.1 Marco Normativo.	36
2.2 Método Marshall.....	37
2.3 Procedimiento del Método Marshall.	39
Resultados y Discusión.	44
3.1 Discusión.	52
Conclusiones.	54
Referencias.....	56

Índice de Tablas

Tabla 1. Calidad del material pétreo.	21
Tabla 2. Granulometría del material pétreo.	22
Tabla 3. Calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa mediante el método Marshall.....	38
Tabla 4. Vacíos en el agregado mineral (VAM) por el método Marshall.	38
Tabla 5. Pruebas de laboratorio para la caracterización de los materiales pétreos.....	40
Tabla 6. Fracciones de material pétreo de la propuesta granulométrica.	41
Tabla 7. Cantidad de probetas para cada contenido asfáltico.....	42
Tabla 8. Resultados de granulometría y calidades de los materiales pétreos del banco “CIACAS”.....	45
Tabla 9. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico PG 70 -22.	46
Tabla 10. Hoja de cálculo de la prueba Marshall.	48
Tabla 11. Gráficas de la prueba Marshall.....	49

Índice de Figuras

Figura 1. Presencia de agrietamiento de más de 3 mm y asentamiento.	11
Figura 2. Presencia de bache y desprendimiento de la carpeta asfáltica.	11
Figura 3. Ubicación del banco de materiales “CIACAS”.	12
Figura 4. Regiones recomendables de cementos asfálticos Grado PG.	26
Figura 5. Fases de una mezcla asfáltica compactada.	31
Figura 6. Carta de viscosidad del asfalto.	46
Figura 7. Pruebas de calidad del cemento asfáltico.	47
Figura 8. Pesaje de mezcla asfáltica antes de colocarlo en la probeta.	50
Figura 9. Colocación de la mezcla asfáltica dentro del molde.	50
Figura 10. Compactación de la mezcla asfáltica con 75 golpes por cara.	50
Figura 11. Cálculo de los espesores de las pastillas cilíndricas.	51
Figura 12. Medición del peso de las pastillas cilíndricas.	51
Figura 13. Prueba Marshall, aplicación de carga a la probeta hasta llegar al fallo.	51

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene su contexto en la carretera Tapanatepec – Talismán, tramo Tapachula – Talismán. El problema general es resolver la presencia de diferentes patologías en el pavimento de concreto asfáltico existente, como son: baches, piel de cocodrilo, asentamientos, grietas, etc. Se eligió analizar los materiales pétreos del banco “CIACAS”, ubicado en el km 2+050 con desviación derecha de 3.0 km del libramiento sur de Tapachula, Chiapas; para diseñar una mezcla asfáltica en caliente eficiente y durable para las solicitaciones del tráfico de dicho tramo estudiado. Dicha investigación tiene como objetivo general: evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall, respetando las normas de calidad vigentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para mejorar la durabilidad, calidad y desempeño en el tramo. Se planteó y se verificó el cumplimiento de la siguiente hipótesis: los materiales pétreos del banco “CIACAS” cumplen con los requisitos establecidos por las normas vigentes de la SCT, para su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. El presente trabajo es de investigación aplicada, debido a que se realizaron pruebas de laboratorio para conocer las características de los agregados pétreos y la aplicación del método Marshall para conocer los parámetros de estabilidad, flujo y vacíos de las diferentes mezclas asfálticas. El nivel de la investigación es descriptivo, siendo el más preciso para explicar las variables en estudio y su relación entre sí. Los instrumentos de recolección de datos que se utilizaron fueron tablas y gráficos, para su mejor análisis y comprensión de estos. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que, en cuanto a la granulometría propuesta (40 % gravas, 40 % arenas y 20 % finos), cumple con los requisitos de la normativa vigente de la SCT. Se obtuvo el resultado final de la investigación, esta nos dice que para una mezcla con los agregados pétreos propuestos y con un resultado del contenido óptimo de asfalto de 5.5 % se cumple con los parámetros requeridos. Se recomienda realizar otras investigaciones posteriores a la que se presenta, con la realización de tramos de prueba; para evaluar el desempeño que tendría la mezcla asfáltica diseñada con el método Marshall y estudiar su comportamiento con cargas de tránsito y los factores climáticos en el tramo estudiado.

Palabras clave: material pétreo, granulometría, mezcla asfáltica, método Marshall, estabilidad, flujo, vacíos, cemento asfáltico.

Introducción

El presente informe de investigación titulado: **“Evaluación de la mezcla asfáltica en caliente con base a su estructura granulométrica en la carretera Tapanatepec – Talismán, tramo Tapachula – Talismán del Estado de Chiapas”**, se elaboró con la finalidad de obtener el Título de Maestría en Ingeniería con Formación en Construcción.

La necesidad de una vía de comunicación surge desde siglos pasados, ya que se necesitaban de vías de comunicación, lo que hoy llamamos “veredas” fueron uno de los primeros caminos que las personas usaban para trasladarse de un lado a otro o bien poder trasladar su mercancía a otros lugares; después vinieron las carreteras rurales que tenían anchos aproximados de 3 a 4 metros donde podían pasar las carretas que eran jaladas por animales, pero aproximadamente entre los años 20s y 30s surge la gran necesidad de que esos caminos existentes crecieran e empezarán a modernizarse, es ahí donde surgen las primeras carreteras pavimentadas claro hoy en día existen carreteras de hasta 80 años de su creación y que con la actualidad han pasado a hacer obsoletas; sin embargo han surgido mejorías en el proceso constructivo y los materiales a usar, tal es el caso de las mezclas asfálticas y la importancia de su uso y su composición. (SCT)

Hoy en día existen mezclas asfálticas que se trabajan en frío o caliente; pero para la construcción de nuevas carreteras, modernizaciones y trabajos de rehabilitación de grandes longitudes es necesario realizar trabajos por mezclas asfálticas en caliente ya que estas tienen mayor durabilidad.

El diseño de mezclas asfálticas nos muestra lo importante que es poder lograr propiedades mecánicas adecuadas en la carpeta asfáltica. Estas propiedades mecánicas influyen en gran medida en el desempeño y la durabilidad de la superficie de rodamiento a lo largo de su vida útil

Es importante mencionar las causas que provocan el deterioro en las carreteras en nuestro estado son:

- Algunos tramos carreteros que aún existen en la actualidad, se construyeron hace más de 40 años con criterios de diseño muy distintos a lo que hoy se exige.
- el tránsito que en la actualidad circulan por la red federal son mucho mayores que hace algunos años.

- el aumento de vehículos pesados ha ido incrementando.

Durante la visita de campo en la carretera Tapanatepec – Talismán, tramo Tapachula – Talismán, perteneciente a la Residencia de Conservación de Carreteras de “Tapachula, Chiapas”, se observó la presencia de diferentes patologías en el pavimento de concreto asfáltico existente, como son: baches, piel de cocodrilo, asentamientos, grietas, etc.

A continuación, se muestran imágenes de las patologías presentes en el tramo:

Figura 1.

Presencia de agrietamiento de más de 3 mm y asentamiento.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodríguez Guillen Galo (2023).

Figura 2.

Presencia de bache y desprendimiento de la carpeta asfáltica.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodríguez Guillen Galo (2023).

Con lo antes mencionado crea la necesidad de investigar y diseñar una mezcla asfáltica en caliente eficiente y durable para las solicitudes del tráfico y clima del tramo mencionado, es por eso que, de acuerdo al Inventario Nacional de Bancos de Materiales, se eligió analizar los materiales pétreos del banco “CIACAS”, ubicado en el km 2+050 con desviación derecha de 3.0 km del libramiento sur de Tapachula, Chiapas. Se justifica su elección debido a dos criterios, el primero, porque es el banco de material más cercano al tramo en estudio y de la región, el segundo, el tipo de material que se encuentra en este banco es grava y arena de río, siendo el más recomendable para su utilización en mezclas asfálticas en caliente.

A continuación, se muestra la ubicación del banco “CIACAS”:

Figura 3.
Ubicación del banco de materiales “CIACAS”.

COMUNICACIONES Inventario Nacional de Bancos de Materiales Buscar (usos probables ó nom) Exportar Reporte

Seleccione el año 2023

Ubicación Listado de bancos

Estado:	Chiapas		
Nombre del banco:	CIACAS		
Kilómetro:	2050		
Ubicación:	KM. 2+050 DESVIACION DERECHA A 3,000 METROS DEL LIBRAMIENTO SUR DE TAPACHULA.		
Latitud:	14.890734	Longitud:	-92.342304
Desviación:	Derecha	Metros:	3000
Tipo de propiedad:	Particular		
Tipo de Material:	GRAVA Y ARENA DE RÍO		
Tratamiento:	Trituración parcial y cribado		
Volumen x 1000 (m³):	250000	Espesor despalme (m):	0.2
Usos probables:	Terracerías, Revestimiento, Subbase, Base, Concreto asfáltico, Mezcla asfáltica en el lugar, Concreto hidráulico, Seto		
Uso de explosivos:	No requiere	Restricciones ecológicas:	No existen
Aspectos económicos:	Conveniente	Reporte calidad:	Reporte

14°53'26.6"N 92°20'32.3"W
Tapachula, 30834 Chis.
Cómo llegar
Ampliar el mapa

Fuente: <http://b.materiales.siac.gob.mx/#>

Por otro lado, es importante mencionar que se utilizó el Método Marshall para diseñar una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa con materiales pétreos del banco antes mencionado.

El método Marshall, formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Estado de Mississippi; más tarde, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, realizaron investigaciones y estudios de correlación, mejorando el procedimiento de prueba Marshall. (Garnica, 2005, p.35)

Para iniciar con la investigación se plantearon las siguientes preguntas:

¿De qué manera se puede contribuir a disminuir las patologías que se presentan en el tramo: Tapachula – Talismán?

¿Las características físicas y mecánicas del material del banco “CIACAS” cumplen con las normativas vigentes de la SCT para su utilización en mezclas asfálticas en caliente?

¿Cuál es el diseño de la mezcla asfáltica para que esta sea eficiente y durable en el tramo en estudio de acuerdo a las normativas vigentes de la SCT?

La hipótesis que se formuló para la investigación es la siguiente:

Los materiales pétreos del banco “CIACAS” cumplen con los requisitos establecidos por las normas vigentes de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente para el tramo: Tapachula – Talismán.

La presente investigación tiene como objetivo general:

Evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall, respetando las normas de calidad vigentes de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para mejorar la durabilidad, calidad y desempeño en el tramo: Tapachula – Talismán.

Tiene los siguientes objetivos específicos:

- Proponer una granulometría de los materiales pétreos a utilizar en la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente de acuerdo a los límites establecidos por las normas de calidad vigentes de la SCT.

- Determinar las características de los materiales pétreos del banco “CIACAS” (gravas y arenas), de acuerdo a los requisitos establecidos por las normas de calidad vigentes de la SCT.
- Analizar los resultados de caracterización del cemento asfáltico grado PG, utilizado en la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente, de acuerdo a los requisitos establecidos por las normas de calidad vigentes de la SCT.
- Analizar los resultados de Estabilidad y Fujo de las mezclas asfálticas ensayadas de acuerdo a los requisitos establecidos por las normas de calidad vigentes de la SCT.
- Determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Los capítulos que se abordan en el presente documento son los siguientes:

Capítulo 1. Marco Teórico. En este capítulo se darán a conocer la recopilación de investigaciones realizadas para dicho proyecto de tesis.

Capítulo 2. Metodología. Esta presenta investigación se elaboraron mezclas con el apoyo de la empresa SELYCC, S.A de C.V.

Capítulo 3. Resultados y Discusión. Este capítulo se presentarán una serie de resultados a base de pruebas en laboratorio, así como también se presentará las discusiones sobre el tema.

Capítulo 4. Conclusiones. En este capítulo se darán las conclusiones, así como también las recomendaciones del tema de investigación con el fin de dar un aporte y cumplir con el objetivo de este proyecto

Marco Teórico

Este capítulo explica los antecedentes de la historia de las mezclas asfálticas y su empleo en las carreteras mexicanas; así también, los métodos que se han creado para el análisis de mezclas asfálticas, teniendo así un conocimiento de la evolución de los mismos. Por consiguiente, explica los conceptos empleados en el desarrollo del tema, por último, se sustenta la línea teórica a utilizar en la investigación.

1.1 Antecedentes.

A continuación, se presenta una breve reseña histórica en México sobre las mezclas asfálticas.

La mayoría de los antecedentes en cuanto a tipos de pavimentos empleados los podemos encontrar en algunas calles de la ciudad de México, pues al ser la ciudad más desarrollada, ha sido un lugar donde se han empleado y probado diferentes tipos de pavimentos a lo largo del tiempo; Uno de los pavimentos más empleados fue el de cantera rosa en baldosa rectangular de 0.40 x 0.30 m y cuyo espesor variaba entre 0.6 y 0.10 m, la superficie de rodamiento obtenida con este material fue muy uniforme, sin embargo, su resistencia a las cargas de circulación era poco aceptable optando por utilizarla solamente en plazas y zonas peatonales. (Tinoco, 2011, p. 79)

Para el año de 1900 se tuvo la primera aplicación de mezcla asfáltica en el Zócalo de la Ciudad de México y algunas calles del centro que fueron pavimentadas con bloques comprimidos de asfalto importados de Europa, esto marcó un hito en el uso de pavimentos en México, ya que esta fue la primera aplicación de productos asfálticos en los pavimentos de los que se tiene conocimiento alguno. Los trabajos de pavimentación con este tipo de materiales fueron asignados a la compañía extranjera denominada Barber. La historia de estos pavimentos tiene lugar desde el año 1824, cuando la firma *Pillot et Eyquem* comenzó a fabricar adoquines de asfalto, (Tinoco, 2011, p. 79)

Se efectuaron pavimentos ejecutados por contrato que se le asignó a la compañía *Neufchatel* que empleaba el pavimento tipo *macadam*; este consistía en la aplicación de tendidos sucesivos de piedra triturada estas se hacían con marro y eran ligadas con asfalto. Este tipo de pavimentos tenía una vida útil de 15 a 25 años y hay quienes afirman que es

el mejor pavimento construido en México y el mundo, sin embargo, por su proceso constructivo tan complicado resulta muy costoso. (Tinoco, 2011, p. 81)

El pavimento tipo macadam proviene desde alrededor del año 1800 cuando Thomas Telford construye más de 1,448 kilómetros de caminos en Escocia perfeccionando el método de construcción de caminos con roca triturada a mano. John Loudon McAdam, usaba roca triturada para formar una superficie firme y poder realizar una utopista en Escocia; observó que las partículas alargadas o lajeadas eran propensas a quebrarse con las cargas del tránsito que en ese entonces necesitaban de rueda de metal, fue así que propuso un pavimento de tres capas de roca estas quebradas a mano, así también innovó y dio aportaciones a los sistemas de drenaje en los caminos, fue entonces que McAdam demuestra que los pavimentos de su autoría eran dos veces más resistentes que los que había realizado Telford. Sin embargo para reducir costos, constructores usaron alquitrán caliente esto servía para poder unir los fragmentos de roca, es ahí donde surgen los pavimentos tarmacadam. Denominados más adelante en México y Estados Unidos como pavimento tipo macadam de penetración. (Tinoco, 2011, p. 81)

En 1920 se empezaron a realizar estudios, ensayos y pruebas para el desarrollo urbano, esto con el fin de reducir significativamente los costos, uno de los primeros sistemas que se aplicaron hablando de caminos, fue el de revestimiento que no era más que nivelar las terracerías del camino, aplicar un riego de liga - con asfalto caliente - y una capa de granzón - triturado de 3/4"- realizando una compactación adecuada con una aplanadora; posteriormente se cubría con una capa de arena y se aplanaba nuevamente la superficie; Este sistema dio buenos resultados en tiempos de sequía, sin embargo, en el de lluvia sufría deterioros por falta de drenes para desahogar el agua. En cuanto al tránsito se presume que se encontraban sometidos aproximadamente hasta 500 vehículos diarios; Este tipo de tratamiento superficial lo encontramos aún en la actualidad para tránsitos no mayores de 2000 vehículos diarios, pero con diferente denominación, ahora es un tratamiento superficial por el sistema de uno o dos riegos, empleado principalmente en zonas con precipitación pluvial baja; El tratamiento por tres riegos ya no es utilizado en la actualidad por su alto costo de construcción y se prefiere la colocación de una carpeta" (Tinoco, 2011, pp. 82-83).

Con las experiencias ganadas, se procedió a elaborar las mezclas asfálticas en el lugar, este método consiste en afinar las terracerías, compactar, depositar el material triturado de 2" a finos en montículos esparcidos para formar un camellón con la

motoconformadora; posteriormente se aplica un riego de asfalto con una petrolizadora y se vuelve el material de un lado a otro con la motoconformadora repitiendo hasta alcanzar una mezcla lo más uniforme posible, tendiéndola con el espesor adecuado de acuerdo al diseño de la carpeta proyectada, ya cuando se encuentra dentro de las tolerancias de líneas y niveles se procede a compactar la mezcla; El inconveniente de este procedimiento es la complejidad para generar una mezcla homogénea, además del control de dosificación de la cantidad de asfalto que se le agrega al pétreo. (Tinoco, 2011, p. 84-85)

La dosificación de los materiales en la elaboración de la mezcla en el lugar fue muy sencilla, pero no precisa; el control en el material pétreo se realizaba mediante el conteo de los camiones y así se determinaba la cantidad de m³ de material en un cierto tramo; en lo referente al producto asfáltico, cualquiera que sea, se llevaba a cabo con el conteo de los tanques de la petrolizadora (asfaltadora) que se agregaban en un tramo determinado con una cantidad de m³ de pétreo conocida, obteniendo un promedio de litros/m³; donde los litros están en función de la capacidad del tanque y del número de estos últimos descargados; La precisión en la dosificación del producto asfáltico para las mezclas elaboradas con este procedimiento estaba a cargo de la experiencia y capacidad del operador de la petrolizadora. (Tinoco, 2011, p. 85-86)

El estudio de los pavimentos en México data aproximadamente del año 1930 en adelante y más detalladamente de 1934 cuando se fundó el primer laboratorio cuya finalidad era estudiar y controlar los materiales que se utilizaban en esa época, principalmente los materiales asfálticos ante el auge de éstos como capa estructural y superficie de rodamiento; Sin embargo, no existía en nuestro país normativa alguna que indicara el procedimiento correcto de elaborar las mezclas asfálticas, teniendo que recurrir a la literatura extranjera, principalmente a la americana, creada principalmente por los fabricantes de asfaltos y que con base en la experiencia y a observaciones en campo y en laboratorio emitieron una serie de recomendaciones para la elaboración de las mezclas asfálticas. (Tinoco, 2011, p. 86)

Los avances en la tecnología para la aplicación de estos pavimentos se derivan en la creación de pequeñas plantas de mezcla asfáltica tanto en caliente como en fría; Las primeras aportaciones en esta materia las realizó el departamento central del Distrito Federal con la instalación de dos plantas de mezcla asfáltica en caliente, aproximadamente en el año de 1936, le siguió otra planta en la ciudad de Chihuahua que se instaló en 1938

principalmente para el mejoramiento de las superficies de rodamiento en calles y calzadas dentro de la ciudad. (Tinoco, 2011, p. 86)

La mayoría de los materiales pétreos empleados en la elaboración de mezclas asfálticas fueron los procedentes de los ríos a los cuales, por su variada granulometría, solamente se les aplicaba un proceso de cribado y de esta manera obtener la granulometría deseada; Alrededor del 80% de los materiales fluviales presentan una mala adherencia con el asfalto, así fue que entre los años de 1945 y 1946 se identificó en las mezclas este problema, haciendo necesaria la aplicación de aditivos promotores de adherencia. (Tinoco, 2011, p. 89)

Con la introducción del sistema de mezcla en caliente se presentaron aún más los problemas de adherencia entre los materiales, esta característica se revisaba al momento de mezclar los materiales y se realizaba de manera cualitativa con base en la experiencia del personal encargado del mezclado, el cual determinaba si fuese necesario la aplicación de aditivos promotores de adherencia o no; Cuando se utilizaban productos rebajados o emulsiones era muy fácil determinar si el pétreo presentaba problemas de adherencia con el asfalto o no, pues en caso de una falta de adherencia el proceso de mezclado se tornaba muy complicado; Con las plantas de mezclado en caliente y con su proceso hasta cierto punto automatizado fue más complicado observar esta característica, además de que el calor favorecía para que el asfalto aparentara un cubrimiento uniforme con el agregado, apareciendo. (Tinoco, 2011, p. 89)

En el año de 1947, la Dirección Nacional de Caminos de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas emite las Especificaciones de Caminos donde el capítulo relacionado a mezclas asfálticas no llega más allá de ser una traducción de las Especificaciones de Construcción del Instituto del Asfalto (*Construction Specificatios, The Asphalt Institute*), (Tinoco, 2011, p. 89).

Para el año de 1957 se observó un cambio importante en las especificaciones ya que se adaptaron un poco a lo utilizado en nuestro país, no dejaban de ser copias de especificaciones norteamericanas, principalmente, pero tomando en cuenta los materiales y procesos constructivos empleados en nuestro país; También nos describen la calidad de los materiales, proceso de elaboración y construcción de la mezcla asfáltica. (Tinoco, 2011, p. 90)

Ante el incremento de la utilización de las mezclas asfálticas en caliente para el año de 1950 ya se tenían alrededor de 12 o 14 plantas y para 1960 ya existían en México más de 40 plantas de producción discontinua o también llamadas bachas por su nombre en inglés *Batch Plant*; Estas plantas tienen un control de dosificación por masa, además el tambor secador de agregado pétreo es independiente del área de mezclado asfalto - pétreo, características que hacen que la mezcla asfáltica cumpla cabalmente con los requisitos de diseño. (Tinoco, 2011, p. 91)

Se apremió la necesidad de tener plantas para mezclado siendo estas portátiles y así transportarlas a los tramos que estaban por construir y así poder disminuir los tiempos de acarreo. Surgen plantas de producción continua de contraflujo y de flujo paralelo; Según el Ing. Gabriel Gutiérrez Rocha, que estas últimas realizan una mezcla con gran calidad tres veces inferior que la planta de bachas, siendo las plantas de producción continua de contraflujo una buena opción para no tener esa pérdida tan grande en la calidad. (Tinoco, 2011, p. 93)

Por otro lado, la elaboración de mezclas asfálticas ha empleado diversos enfoques para determinar un diseño óptimo en el laboratorio, siendo los métodos de Marshall y Hveem los más frecuentemente empleados. En México, el método de Marshall es el más comúnmente utilizado en la práctica. (Garnica et al., 2005, p. VII)

Según Padilla (2004), a continuación, se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente (p. 47):

- ✚ *The Hubbard-Field* (1920's). el primer método en evaluar contenido de vacíos en mezcla, así como en el agregado mineral fueron los métodos de diseño de mezclas asfálticas. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.
- ✚ Método *Marshall* (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

- ✚ Método *Hveem* (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.
- ✚ Método de la *Western Association of State Highway on Transportation Officials*. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas. Con FHWA.
- ✚ Método de *Asphalt Aggregate Mixture Analysis System*. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura. Con NCHRP.
- ✚ Método *SUPERPAVE* (1993). El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método *SUPERPAVE*, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el *SUPERPAVE* es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. *SUPERPAVE* promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

1.2 Marco Conceptual.

En este apartado se dan a conocer los conceptos generales del tema de estudio, también se expone las normas y requisitos de los materiales pétreos para la elaboración correcta de mezclas asfálticas en caliente, de acuerdo a la secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT).

1.2.1 Caracterización de los materiales pétreos.

Los agregados pétreos juegan un papel preponderante en el comportamiento y desempeño de las capas de rodadura en pavimentos asfálticos, puesto que volumétricamente pueden representar entre el 90% y el 75% de los componentes, según el tipo de concreto asfáltico a colocar: denso, semidenso, drenante, entre otros (Aceros, 2002, p.1).

De acuerdo con la Normativa N-CMT-4-04/17 (Normativa. Características de los materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas), los materiales pétreos deben de contar con las siguientes características (SCT, 2017, p. 3):

Tabla 1.

Calidad del material pétreo.

Característica ^[1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		30
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	95
	Dos o más caras	85
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		45
Equivalente de arena; %, mínimo		50
Azul de metileno, mg/g, máximo		15

[1] El material será 100% producto de trituración de roca sana.

[2] Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio.

Fuente: N-CMT-4-04/17. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#>

1.2.1.1 Granulometría.

Tomando como referencia el manual M-MMP-4-04-002/02.), esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas; El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa. (SCT, 2002, p. 1)

De acuerdo con la Norma N-CMT-4-04/17 (Normativa. Características de los materiales. 4 Materiales para pavimentos. 04 Materiales pétreos para mezclas asfálticas), los materiales pétreos deben de cumplir con los siguientes requisitos de granulometría, para mezclas asfálticas de granulometría densa, empleados para un tránsito esperado (ΣL) mayor a un millón de ejes equivalentes, dato que se toma en cuenta en el trabajo de estudio. (SCT, 2017, p. 3)

Tabla 2.

Granulometría del material pétreo.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5	12,5	19	25	37,5
		($\frac{3}{8}$)	($\frac{1}{2}$)	($\frac{3}{4}$)	(1)	($1\frac{1}{2}$)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	$1\frac{1}{2}$ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	$\frac{3}{4}$ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	$\frac{1}{2}$ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	$\frac{3}{8}$ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	$\frac{1}{4}$ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumple con una determinada granulometría.

Fuente: N-CMT-4-04/17. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#CMT>.

1.2.1.2 Densidad relativa.

De acuerdo al manual M-MMP-4-04-003/18, estas pruebas permiten determinar las densidades relativas de los materiales pétreos, es decir, sus relaciones masa-volumen respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales pétreos, propiedades que se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por los materiales en la mezcla asfáltica; las densidades relativas se determinan mediante dos pruebas, una para la fracción del material pétreo retenida en la malla N°4 (4,75 mm) y otra para la que pasa dicha malla. (SCT, 2018, p.1)

1.2.1.3 Desgaste de los ángeles.

De acuerdo al manua: M-MMP-4-04-006/02, el objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas; La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla N°12 (1,7 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento. (SCT, 2002, p.1)

1.2.1.4 Desgaste Microdeval.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-007/23, esta prueba permite determinar la resistencia a la degradación por abrasión en condiciones húmedas de los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas, midiendo la pérdida de masa de la muestra después de haber sido sometida al proceso abrasivo y expresando el resultado en porcentaje (SCT, 2023, p.1).

1.2.1.5 Intemperismo acelerado.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-008/03, el objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas; La prueba consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos, mediante el empleo de una solución saturada de sulfato de sodio o

magnesio, y medir la diferencia de su masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento. (SCT, 2003, p.1)

1.2.1.6 Partículas alargadas y lajeadas.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-005/08, esta prueba determina el contenido de partículas que tienen formas alargada y lajeada que se encuentran presentes en materiales pétreos empleados para mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N°4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud. (SCT, 208, p.1)

1.2.1.7 Partículas trituradas.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-013/09, esta prueba permite determinar el contenido de partículas trituradas presentes en los materiales pétreos, retenidos en la malla N°4 (4,75 mm), para mezclas asfálticas, a que se refiere la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas; La prueba consiste en agrupar las partículas con una y con dos o más caras fracturadas para conocer su porcentaje respecto a la masa total de las partículas retenidas (SCT, 2009, p.1).

1.2.1.8 Desprendimiento por fricción.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-009/03, el objetivo de la prueba es determinar la pérdida de la película asfáltica en los materiales pétreos; La prueba consiste en someter a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio, varias muestras de mezcla asfáltica de granulometría definida, evaluando su estado físico una vez sometidas a este tratamiento. (SCT, 2003, p.1)

1.2.1.9 Angularidad.

La angularidad de los agregados gruesos y finos, buscaban lograr una mezcla asfáltica en caliente con un alto ángulo de fricción interna y así, una alta resistencia al corte y por ende una alta resistencia al ahuellamiento o roderas; Limitando las partículas alargadas y planas se asegura que los agregados de la mezcla asfáltica serán menos

susceptibles a fractura durante el manipuleo, construcción y bajo tránsito; Limitando la cantidad de arcilla en el agregado, la unión entre el ligante y el agregado es fortalecida y mejorada. (Delgado et al., 2006, p. 29)

1.2.1.10 Equivalente de arena.

De acuerdo al manual: M-MMP-4-04-004/16, esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas; La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla. (SCT, 2016, p.1)

1.2.1.11 Azul de metileno.

De acuerdo al manual M-MMP-4-04-014/09, esta prueba permite estimar el grado de reactividad de los materiales finos, con partículas menores de 0,075 mm (malla N°200), contenidos en los materiales pétreos para mezclas asfálticas; La prueba consiste en añadir a los finos dosificaciones controladas de azul de metileno, hasta que ya no lo absorban más; Mientras más azul de metileno retengan los finos, serán más activos, lo cual proporciona un índice indirecto de su potencialidad expansiva. (SCT, 2009, p.1)

1.2.2 Caracterización de material asfáltico.

Según la normativa: N-CMT-4-05-001/22, define a un cemento asfáltico como:

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites; Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo. (SCT, 2022, p.1)

Por otro lado, es importante mencionar la definición del concepto de cemento asfáltico grado PG, debido a que este material será empleado en la elaboración de los especímenes de prueba de las mezclas asfálticas.

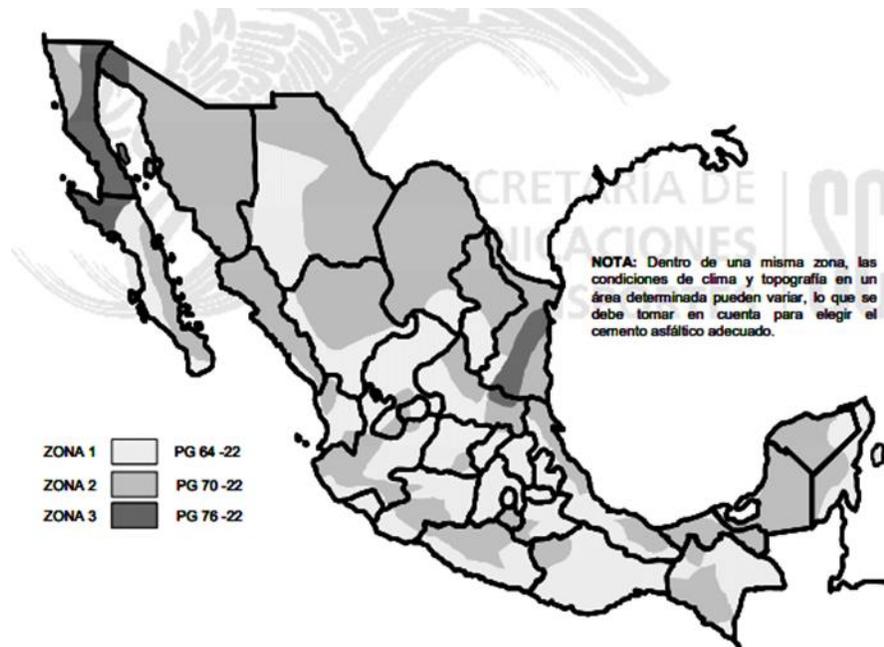
Según la normativa: N-CMT-4-05-004/08, define los cementos asfálticos grado PG como:

Son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, por la intensidad del tránsito esperada y por la velocidad de operación de la carretera, a partir de las cuales se asegura un desempeño adecuado para resistir deformaciones agrietamientos por temperaturas bajas y agrietamiento por fatiga en condiciones de trabajo que se han correlacionado con pruebas y tratamientos especiales para producir simulaciones e envejecimiento a corto y a largo plazo. (SCT, 2008, p.1)

Según la normativa: N-CMT-4-05-004/08, se tiene que tomar en consideración la figura 4 que se muestra a continuación, para elegir la utilización adecuada de cementos asfálticos grado PG. (SCT, 2008, p.3)

Figura 4.

Regiones recomendables de cementos asfálticos Grado PG.



Fuente: N-CMT-4-05-004/05. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#>

1.2.3 Tipos de mezclas asfálticas.

Según la normativa: N-CMT-4-05-003/16, una mezcla asfáltica “es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo”. (SCT, 2016, p.1)

De acuerdo a Padilla (2004), existen parámetros de clasificación para establecer diferencias entre las mezclas, estos parámetros son (pp. 45-46):

a) Proporción de Vacíos

Parámetro de mucha importancia, esto debido a que se deben evitar deformaciones plásticas a consecuencia de las cargas y de variaciones térmicas.

- Mezclas Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

b) En función a la temperatura de fabricación:

- Mezclas asfálticas en Caliente: creada con cementos asfáltico a una temperatura elevada, a 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, los agregados deben de tener también una temperatura elevada, para que no llegue a enfriarse el al entrar en contacto con ellos. En obra la aplicación deberá ser a temperaturas muy superiores al ambiente, ya que de lo contrario los materiales no podrán extenderse ni compactarse.

- Mezclas asfálticas en Frío: Por lo general son fabricados con una emulsión o asfaltos rebajados, y material pétreo de la región, la temperatura de aplicación se realiza a temperatura ambiente.

c) Por la Granulometría.

- Mezclas Continuas: Tienen agregados pétreos de diferentes tamaños pero bien distribuidos.

- Mezclas Discontinuas: Presentan tamaños de agregado pétreo en un solo rango, lo cual provoca una discontinuidad en la granulometría.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- Mezclas Gruesas: Esta clasificación corresponde a las mezclas asfálticas en las cuales se utilizan materiales pétreos con tamaños máximos superiores a la malla de 1/2”

- Mezclas Finas: se les conoce como “micro aglomerado, o morteros asfálticos, mezclas formadas por un árido fino, así como el polvo mineral y un ligante asfáltico. El espesor mínimo se determinará por el tamaño máximo del agregado con el que se extenderá una mezcla que tendrá el doble o triple del tamaño máximo..

En esta investigación se tomará en cuenta únicamente las mezclas asfálticas tipo densa, fabricadas en caliente, con granulometría continua, que es de las más utilizadas en nuestro país.

1.2.4 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en la selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto, de tal manera que se obtengan las propiedades deseadas en la mezcla y se satisfagan los requisitos específicos del proyecto; La selección apropiada de los materiales (con la calidad suficiente) que constituirán la mezcla y de sus proporciones correctas, requiere el conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas, y de su influencia en el comportamiento del pavimento (Garnica et al., 2005, p. 2).

Según Garnica et al., (2005), propiedades de mayor importancia en la mezcla asfáltica en caliente son (pp. 2-4):

A) Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas.

Esto refiere a la capacidad que tiene la mezcla asfáltica para resistir deformación y desplazamiento, generadas por las cargas del tránsito vehicular. Un pavimento será estable

cuando aún conserve su forma; y será inestable cuando presente deformaciones permanentes o presencia de desplazamiento de la mezcla. La estabilidad dependerá de la fricción que exista interna y la cohesión. La fricción interna dependerá de una textura superficial, así como de la forma de la partícula, y de la granulometría del agregado; de igual manera dependerá de la densidad de la mezcla, cantidad y el tipo de asfalto; por lo tanto, la cohesión dependerá del contenido de asfalto. La cohesión se incrementará conforme aumente el contenido de asfalto, hasta obtener su punto óptimo, derivado del aumento en el contenido de asfalto esta forma una película muy gruesa en las partículas de asfalto, derivado de ello, se producirá una pérdida de fricción en las partículas de agregado.

B) Durabilidad.

Describe su capacidad a la resistencia del aire, agua, temperatura y tránsito que son factores que pueden acelerar el envejecimiento prematuro del asfalto, así como la desintegración de los agregados y el desprendimiento del asfalto del agregado. Esta propiedad está relacionada directamente con el espesor de la película de asfalto, así como con los vacíos de aire.

C) Flexibilidad.

Tiene la facilidad de adaptarse o moldearse, sin presentar agrietamientos o fisuras, por asentamientos, movimientos ocasionales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad puede entrar en conflictos con los requisitos de estabilidad del pavimento.

D) Resistencia a la fatiga.

Capacidad para resistir cargas por el paso del tránsito; esta propiedad está relacionado por la fatiga así como por el contenido y rigidez del asfalto. Por lo tanto, el contenido de asfalto alto, provocará que la mezcla tenga una deformación elástica (o tienda a deformarse menos) que a fracturarse. No se debe olvidar que del espesor estructural de la capa y la carga dependerá la resistencia a la fatiga.

E) Resistencia al fracturamiento por baja temperatura.

Capacidad de la mezcla asfáltica para no agrietarse a temperaturas bajas, esto dependerá de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

F) Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad.

Esta propiedad se refiere en sí a la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior de la mezcla, o a través de la propia mezcla. La resistencia al daño por humedad está relacionada con propiedades químicas del agregado mineral y al contenido de vacíos de aire en la mezcla que ya está compactada, así como con los procesos de oxidación del asfalto, la adherencia y el drenaje del pavimento.

G) Resistencia al deslizamiento.

Esta propiedad no permite perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, sobre todo cuando esta se encuentra húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona directamente con las características del agregado y el contenido de asfalto.

H) Trabajabilidad.

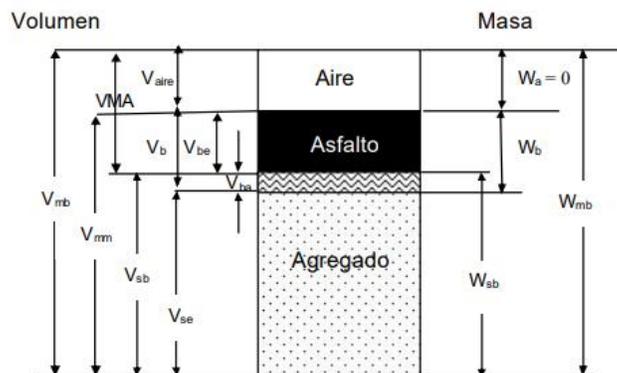
Se refiere a la facilidad con la que la mezcla asfáltica se coloca y compactada in situ. Una mezcla buena debe ser accesible a una buena colocación así como a su compactación, sin necesidad de requerir un gran esfuerzo. Esta propiedad dependerá de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto.

1.2.5 Diagrama de fases en mezclas asfálticas.

En una mezcla asfáltica se tienen tres fases; la sólida, que está formada por el agregado mineral; la líquida, que es el asfalto; y la fase gaseosa, que comprende al aire; Debido a que el agregado mineral, que forma parte de la mezcla asfáltica es poroso, una parte del asfalto es absorbido por los poros del agregado, por tanto, una porción del agregado y del asfalto comparten espacio; a esta porción se le llama asfalto absorbido; La consideración de la absorción de asfalto permite subdividir la fase de volumen del asfalto en volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido; y la fase de volumen del agregado, en volumen de agregado total y volumen de agregado efectivo. (Garnica, 2005, p. 15).

En la figura 5 se muestra de forma esquemática el diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada, para describir las propiedades de masa y volumen.

Figura 5.
Fases de una mezcla asfáltica compactada.



Fuente: Paul, G.A., Horacio, D., y Carlos, S. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt271.pdf>

Donde:

V_{mb} = volumen total de la mezcla compactada

V_{mm} = volumen de la mezcla sin vacíos

VMA = volumen de vacíos en el agregado mineral

V_{sb} = volumen total del agregado

V_{se} = volumen efectivo de agregado

V_{be} = volumen efectivo de asfalto

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido

V_{aire} = volumen de aire

W_{mb} = masa total de la mezcla compactada

W_a = masa del aire

W_b = masa del asfalto

W_{sb} = masa total del agregado

Según Garnica et al., (2005), se deberá de analizar la mezcla asfáltica compactada, esto será con base al volumen, por tanto se presenta el diagrama de fases (pp. 16-17):

- 1) Volumen de asfalto efectivo, V_{be} : volumen de asfalto que cubre las partículas de agregado.
- 2) Volumen de asfalto absorbido, V_{ba} : se refiere al volumen de asfalto que es absorbido por los poros externos del agregado.
- 3) Volumen total del agregado, V_{sb} : volumen total del agregado se entiende como el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua.
- 4) Volumen efectivo del agregado, V_{se} : Volumen del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.

- 5) Volumen aparente del agregado, V_{sa} : Volumen del sólido del agregado, esto quiere decir, que no incluye el volumen de los poros permeables al agua.

1.2.6 Características de la mezcla asfáltica en caliente.

Según Crespín et al., (2012), la mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento; Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla (pp. 187-190):

A) Densidad.

La densidad de una mezcla asfáltica se suele definir como su peso unitario, esto se refiere al peso de un volumen específico de la mezcla compactada. Se necesita de la densidad para poder lograr un rendimiento duradero. Cuando la densidad es baja la cantidad de vacíos deberán de ser mayores, por lo cual la mezcla compactada se hará vulnerable al agua. Sin embargo, si la densidad es alta la cantidad de vacíos será menor, el agua no entrará en su interior dando como resultados una carpeta duradera. Su expresión de la densidad es; en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pie^3), se calcula al multiplicar gravedad específica total por la densidad del agua que es ($1,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ o $62.416 \text{ lb}/\text{pie}^3$). La densidad patrón que se obtiene es un referente para lograr determinar si es adecuada o no el grado de compactación del pavimento compactado en obra. Será difícil obtener una densidad patrón in-situ sin embargo las especificaciones suelen permitir un porcentaje aceptable.

B) Vacíos de aire.

Los vacíos, presentes entre los agregados que son revestidos de asfalto en la mezcla compactada, no son más que espacios pequeños de aire o bolsas de aire. Es crucial que las mezclas densamente graduadas logren un porcentaje de vacíos, ya que estos permitirán que el asfalto fluya durante la compactación esto debido al tráfico. El porcentaje para las capas de base y las superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad se relaciona con la durabilidad de un pavimento asfáltico. Cuando existe mayor permeabilidad, existirá mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de una mezcla entre agua y el

aire, esto causará un deterioro que será irreversible a la carpeta asfáltica. Sin embargo, al tener un contenido bajo de permeabilidad, tiende a producirse exudación de asfalto. Esta exudación no es más que el exceso de asfalto es “exprimido”, o expulsado fuera hacia la superficie. Densidad y contenido de vacíos nos muestra que; a mayor densidad, menor porcentaje de los vacíos y que a menor densidad, mayor será el porcentaje de vacíos en la mezcla.

C) Vacíos en el agregado mineral (VAM).

Son los espacios de aire que existen en las partículas de agregado y los espacios llenos de asfalto de una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir, el VMA es el espacio para acomodar; volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos que necesitará en la mezcla. El volumen efectivo se refiere a todo el asfalto menos la porción que tiende a perderse, por absorción, en el agregado, pero si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Siempre hay que tener en cuenta entre más gruesa la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtendrá mayor durabilidad en la mezcla. Se deberá cumplir con los valores como mínimos ya que si esto no ocurre será perjudicial para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

D) Contenido de asfalto.

Este contenido es establecido con los criterios del método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto dependerá en gran medida de la granulometría y su capacidad de absorción del agregado. La granulometría de dicho agregado estará directamente relacionada al contenido óptimo de asfalto. Si el porcentaje de finos es alto, el área total superficial será aún mayor, por lo cual se requerirá mayor cantidad de asfalto para poder lograr cubrir todas las partículas. Al contrario de las finas, las mezclas gruesas requieren menos asfalto esto es debido a que el área superficial total es menor. Sin embargo, si a la mezcla se le agregan pequeñas cantidades de filler, existe la probabilidad de tender a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, esto tendrá como resultado mezcla inestable y seca pero si se realiza lo contrario, disminución de filler, daría como resultado una buena mezcla.

E) Vacíos llenos de asfalto.

Son vacíos intergranulares entre partículas del agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El volumen de vacíos en el agregado mineral abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al realizar la resta de los vacíos de aire del VMA, posteriormente dividiendo por el VMA, y se expresa el valor como un porcentaje.

1.2.4 Línea Teórica

Es fundamental destacar que los estándares de calidad para los agregados pétreos y el asfalto utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas son establecidos por las autoridades responsables del desarrollo de la infraestructura. En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es el organismo encargado de fijar los requisitos que deben cumplirse para el diseño y control de las mezclas asfálticas.

De acuerdo a esta información, el estudio de la evaluación de la mezcla asfáltica en caliente con base a su estructura granulométrica se desarrolla desde las normativas: N-CMT-4-04/17 y la normativa N-CMT-4-05-004/08 la cual, nos ayudarán a determinar las características de los materiales pétreos del banco "CIACAS" (gravas y arenas), y verificar el cumplimiento de los requisitos del cemento asfáltico PG 70 -22, para la elaboración de las probetas cilíndricas. Por consiguiente, la aplicación del método Marshall de acuerdo al manual: MMP-4-05-034/23, nos ayudará a comprender el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla asfáltica en caliente, para mejorar su durabilidad, calidad y desempeño en el tramo: Tapachula – Talismán.

Metodología.

El presente trabajo es de investigación aplicada, debido a que se realizaron pruebas de laboratorio para conocer las características de los agregados pétreos y la aplicación del método Marshall para conocer los parámetros de estabilidad y flujo de las diferentes mezclas asfálticas. Por consiguiente, se consideró que un método cuantitativo descriptivo sería el más preciso para explicar las variables en estudio y su relación entre sí, todos los datos numéricos obtenidos están sujetos a medición e interpretación de acuerdo a las normas vigentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

2.1 Marco Normativo.

El marco normativo nos servirá para caracterizar los materiales pétreos y el cemento asfáltico que se usaron, así como para establecer requisitos de calidad y el procedimiento para determinar el contenido de cemento para una mezcla asfáltica en caliente, se realizó conforme a la Normativa para la Infraestructura del Transporte en vigor para el año 2023. Específicamente los siguientes libros:

- CMT. Características de los Materiales; Parte 4.
- Materiales para Pavimentos; Títulos 04.
- Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, 05.
- Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas; Capítulos 003.
- Calidad de mezclas Asfáltica para Carreteras y 004.
- Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG y Libro MMP.
- Métodos de Muestreos y Pruebas de Materiales; Títulos 04.
- Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas y 05.
- Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas.

2.2 Método Marshall.

El método Marshall se describe por vez primera en México en las normas de construcción de la SCT de 1981 y se basa en la determinación de la estabilidad y el flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado y probados a sesenta grados Celsius. (Tinoco, 2011, p. 105)

“El criterio del procedimiento Marshall fue creado por BRUCE MARSHALL, ex-Ingeniero de Bitúmenes del Departamento de Rutas del Estado de Mississippi” (Evolym, 2019, p. 60).

“El Ensayo Marshall, surgió de una exploración iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Batallón de los USA en 1943. Numerosos procedimientos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un procedimiento fácil” (Evolym, 2019, p. 60).

Este proceso requiere de probetas normalizadas de 2.5 pulgadas (6.35 cm) de altura y 4 pulgadas (10.16cm) en diámetro. Se organizan empleando un trámite especificado para calentar, combinar y compactar la mezcla de asfalto y agregados; Los dos puntos claves del procedimiento Marshall son un examen de las relaciones entre consistencia y volumen de huecos y un ensayo para la determinación de la estabilidad y fluencia de las probetas compactadas. (Evolym, 2019, p. 60).

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrolla cuando es ensayado a una temperatura de 60° C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Evolym, 2019, p. 61).

El objetivo principal del método Marshall, es determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados; así como también proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de mezcla asfáltica en caliente, de tal manera que sea posible establecer si cumple en lo referente al establecimiento de densidades y contenidos óptimos de vacío durante la construcción de la capa del pavimento. (Evolym, 2019, p. 59).

El procedimiento de este método es el uso de varias probetas, pero cada una será preparada con las mismas cantidades de granulometría, pero con contenidos asfálticos

diferentes; estas probetas se preparan realizando un procedimiento específico que consiste en calentar el asfalto y los agregados, se debe mezclar y compactar. (Evolym, 2019, p. 59).

Las mezclas asfálticas en caliente deben cumplir con los siguientes requisitos, de acuerdo a la normativa: N-CMT-4-05-003/16.

Tabla 3.

Calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa mediante el método Marshall.

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lbr), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Fuente: N-CMT-4-05/16. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#>

En la tabla previa se detallan las especificaciones que la mezcla asfáltica elaborada debe cumplir, incluyendo los ensayos requeridos y los rangos de valores que deben alcanzarse para ser considerados aceptables.

Para el estudio de la presente investigación se consideraron 75 golpes en cada cara de la probeta con ejes equivalentes de: $10^6 < \Sigma L \leq 10^7$.

Tabla 4.

Vacios en el agregado mineral (VAM) por el método Marshall.

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9,5	$\frac{3}{8}$ "	14	15	16
12,5	$\frac{1}{2}$ "	13	14	15
19	$\frac{3}{4}$ "	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	$1\frac{1}{2}$ "	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Fuente: N-CMT-4-05/16. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#>

En la tabla 4, se describe las especificaciones que debe cumplir la mezcla asfáltica en cuanto a los vacíos de aire de acuerdo al tamaño nominal del material pétreo utilizado en la elaboración de las mezclas asfálticas, va de 3 % al 5 %. Un punto de partida para iniciar con el diseño de la mezcla es escoger un promedio de los porcentajes de vacíos de aire, el cual es el 4%.

2.3 Procedimiento del Método Marshall.

Para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa, se tomó en cuenta previamente los siguientes requisitos:

- ✚ El tipo de cemento asfáltico utilizado es el PG 70 -22 de acuerdo a la normativa: N-CMT-4-05-004/08, véase la figura del capítulo 1. Estos cementos asfálticos resisten deformaciones por temperaturas de hasta 70°C en el lugar de su aplicación y agrietamientos causados por temperaturas no menores a -22°C en el lugar de su aplicación.

- ✚ Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron materiales del banco “CIACAS”, ubicado en el km 2+050 con desviación derecha de 3.0 km del libramiento sur de Tapachula, Chiapas. Se realizaron las pruebas en una mezcla asfáltica de granulometría densa, con tamaño nominal del material pétreo de 19.0 mm (3/4”).

- ✚ Se consideró un número de ejes equivalentes de diseño para tráficos mayores: $10^6 < \sum L \leq 10^7$.

A continuación, se enuncian los pasos a seguir para la aplicación del método Marshall, de acuerdo a las “Normas para muestreo y prueba de los materiales, equipos y sistemas” tomo (II) - SCT y así obtener datos de desempeño de las mezclas asfálticas en caliente (p. 253).

- A. Primero, se procedió a determinar la calidad de los materiales pétreos, de acuerdo a la normativa N-CMT-4-04/17, se contó con el apoyo de la empresa Señalamientos, Laboratorio y Control de Calidad S.A DE C.V, (SELYCC).

Tabla 5.

Pruebas de laboratorio para la caracterización de los materiales pétreos.

CARACTERISTICAS	MANUAL
GRAVA	
Granulometría	M-MMP-4-04-002/02
Densidad relativa del material pétreo seco	M-MMP-4-04-003/18
Desgaste de Los Ángeles	M-MMP-4-04-006/02
Desgaste Microdeval	M-MMP-4-04-007/23
Intemperismo acelerado	M-MMP-4-04-008/03
Partículas alargadas y lajeadas	M-MMP-4-04-005/08
Partículas trituradas	M-MMP-4-04-013/09
Desprendimiento por fricción	M-MMP-4-04-009/03
ARENA Y FINOS	
Granulometría	M-MMP-4-04-002/02
Densidad relativa del material pétreo seco	M-MMP-4-04-003/18
Angularidad	M-MMP-4-04-004/16
Equivalente de arena	M-MMP-4-04-004/16
Azul de metileno	M-MMP-4-04-014/09

Fuente: Elaboración propia.

- B. Al mismo tiempo se determinó la calidad del cemento asfáltico (PG 70 -22), se tomó en cuenta los requisitos de calidad descritos en la normativa: N-CMT-4-05-004/18, Las pruebas correspondientes fueron realizadas por la empresa Supervisión y Control de Obra S.A DE C.V, SUCOBSA. Empresa certificada NMX-C-442-ONNCCE-2010.

Se obtuvieron datos de los rangos de temperatura de compactación y de mezclado, que fueron considerados para la realización de los especímenes de prueba.

- C. Una vez que se realizaron los puntos antes mencionados, se procedió a generar una propuesta granulométrica para tomarse en cuenta en la elaboración de los especímenes de prueba:

Tabla 6.

Fracciones de material pétreo de la propuesta granulométrica.

MATERIAL PÉTREO	PORCENTAJES EN MASA (%)
Grava (3/4" a N° 4)	40
Arena	40
Finos (1/4" A finos)	20

Fuente: Elaboración propia.

- D. Posteriormente se procedió a calentar los materiales pétreos a una temperatura de 149 °C – 155 °C y de igual manera el cemento asfáltico PG 70 -22 a una temperatura de 164.0 °C - 167 °C.
- E. Alcanzando las temperaturas mencionadas anteriormente se procedió a pesar el material pétreo y se determinó la cantidad de cemento asfáltico para agregarse a la mezcla, en este caso se agregó 4.0 %, 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 % y 7.0 % a

los 1,100 gr de material pétreo, cada una en su respectiva charola. En total se realizaron 21 probetas.

Tabla 7.

Cantidad de probetas para cada contenido asfáltico.

% de C.A al agregado	N° de probetas
4.0	3
4.5	3
5.0	3
5.5	3
6.0	3
6.5	3
7.0	3

Fuente: Elaboración propia.

- F. En este apartado se realizó la homogenización del material pétreo con el cemento asfáltico, hasta obtener una mezcla totalmente en color negro.
- G. Antes de iniciar con la compactación de la mezcla, los instrumentos como son el pisón, el molde, la base y la extensión se calentaron en baño de agua a 90 °C, esto con la finalidad de que no haya una diferencia térmica significativa y todo el procedimiento se realice a cierta temperatura.
- H. Después se procedió a armar el sistema en el pedestal colocando una hoja de papel filtro en la base circular del pedestal donde va el molde con la base y la extensión, se colocó la mezcla dentro del molde y encima de colocó otra hoja de papel filtro, se apoya el pisón sobre la mezcla y se le aplico 75 golpes por cara, manteniendo la cara del pisón paralela a la base del molde durante la compactación. Esta operación se realizó lo más rápido posible para evitar que la mezcla se enfríe y con esto que no se compacte de manera adecuada la pastilla.

- I. Se dejó enfriar las pastillas a temperatura ambiente hasta que fraguó el cemento asfáltico.
- J. Posteriormente se desmoldaron las pastillas con ayuda de un gato hidráulico y se determinan sus espesores.
- K. En seguida se pesaron las pastillas secas en una báscula, obteniendo el peso sin recubrimiento al aire, después se recubrieron con estearato de zinc y nuevamente se pesaron.
- L. Una vez recubiertos de estearato de zinc y pesados en seco, se sumergieron en agua y determinó su peso sumergido en agua, con estos datos se determinó el peso volumétrico de las pastillas.
- M. Se procedió a colocar las pastillas en un baño de agua a una temperatura de 60 °C, por el tiempo de 30 a 40 minutos aproximadamente, dentro del mismo se colocaron las mordazas donde posteriormente se colocaron las muestras.
- N. Después se secaron las pastillas y se llevaron a la máquina de prueba Marshall, donde se sometieron a una carga a una velocidad constante hasta que se produjo la falla, obteniendo los parámetros de estabilidad y flujo de cada una de las probetas.
- O. Por último, se registraron los datos obtenidos en una tabla para su respectivo análisis.
- P.

Resultados y Discusión.

En este capítulo, se plantean los resultados obtenidos de las pruebas de calidad de los materiales pétreos del banco "CIACAS" y del cemento asfáltico utilizado en la elaboración de probetas cilíndricas para la aplicación del método Marshall, con la finalidad de determinar su estabilidad (carga máxima) y flujo (deformación). También se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos.

Primero se dará a conocer los resultados obtenidos de la prueba de granulometría y calidades de los materiales pétreos del banco "CIACAS", pruebas realizadas en el laboratorio de la empresa SELYCC S.A DE CV, del 19 al 24 de febrero de 2024.

Por otro lado, las pruebas correspondientes de la calidad del cemento asfáltico (PG 70 -22) fueron realizadas por la empresa Supervisión y Control de Obra S.A DE C.V, SUCOBSA, obteniendo los resultados de la tabla 9.

También se obtuvo los siguientes datos de acuerdo a la carta de viscosidad del asfalto:

Temperatura de compactación teórica: 149.0 °C – 155.0 °C

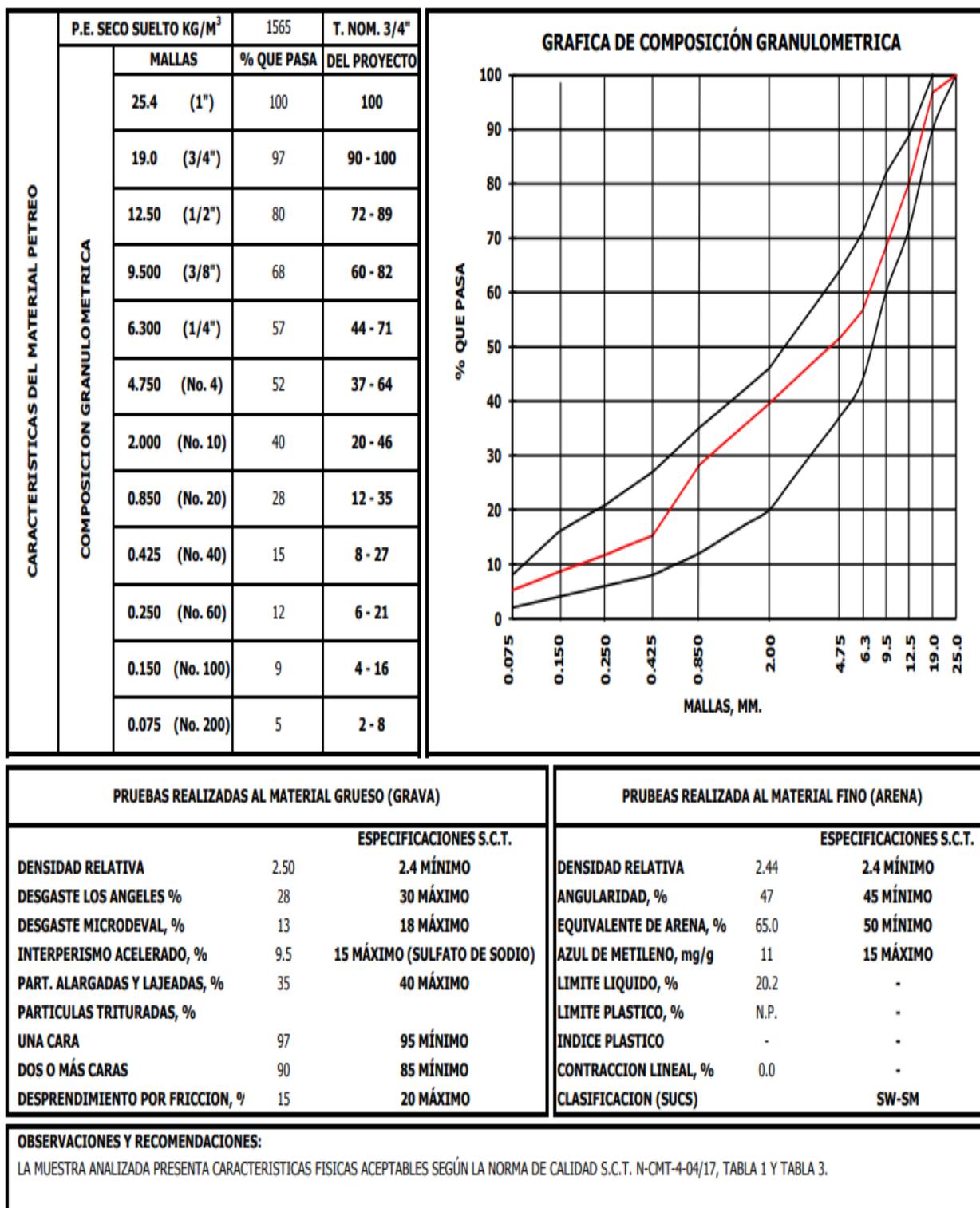
Temperatura de mezclado teórica: 164.0 °C – 167.0 °C y

Densidad del cemento asfáltico: 1.044.

Los datos antes mencionados fueron considerados para la elaboración de las probetas para la aplicación de la prueba Marshall.

Tabla 8.

Resultados de granulometría y calidades de los materiales pétreos del banco "CIACAS".



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.

Resultados de la caracterización del cemento asfáltico PG 70 -22.

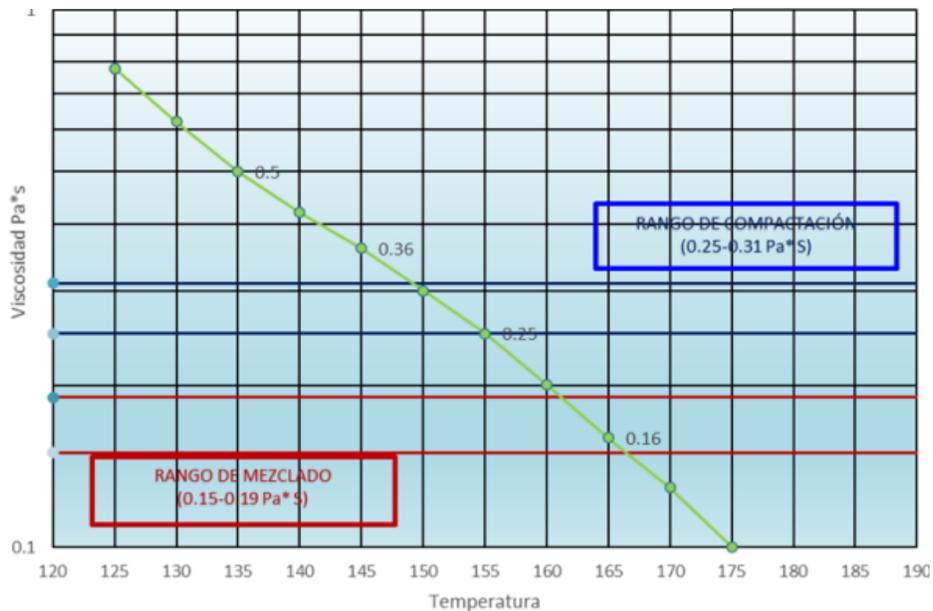
Temperatura	Asfalto No envejecido	Resultado	Método de Prueba	Norma	Conclusión
135°C	Viscosidad Rotacional Brookfield, Pa.S, máximo	1.380	M-MMP-4-05-005	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Punto de Inflamación Cleveland; °C, Mínimo	295	M-MMP-4-05-006	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	60.5	M-MMP-4-05-009	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Separación, diferencia anillo y esfera, °C, máximo	0.2	M-MMP-4-05-022	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
25°C	Recuperación elástica por torsión, %, mínimo.	53.2	M-MMP-4-05-024	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
70°C	Modulo de Corte IG*1 (Pa)	1045	ASTM D7175	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Angulo de fase σ (grados)	85.74			
	$G^* / \sin \delta$ (Kpa)	1.3			
Asfalto envejecido después de horno rotatorio de película delgada					
163°	Cambio de masa por calentamiento, %, máximo	0.350	ASTM D2872	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
25°	Recuperación elástica en ductilómetro, %, mínimo	76.26	M-MMP-4-05-026	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
70°C	Modulo de Corte IG*1 (Pa)	2380	ASTM D7175	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Angulo de fase σ (grados)	81.51			
	$G^* / \sin \delta$ (Kpa)	2.407			
70 °C	Valor Jnr a 3.2 Kpa en MSCR; kPa-1, máximo	1.92	M-MMP-4-05-055	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Valor RE a 3.2 Kpa en MSCR; %, mínimo	33.20			Cumple norma
Asfalto envejecido después de envejecimiento a presión.					
28°C	Modulo de Corte IG*1 (Pa)	1546	ASTM D6521	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Angulo de fase σ (grados)	45.67			
	Rigidación máxima (Kpa)	985			
Propiedad Reológica en el ensaye de Flexión de vigas.					
-12°C	Rigidez a carga constante (Mpas)	150	ASTM D6648	N-CMT-4-05-004-18	Cumple norma
	Relación logaritmica rigidez/tiempo valor	0.305			Cumple norma
GRADO DE DESEMPEÑO		70H-22			

Fuente: SELYCC S.A DE C.V

En la figura 6, se muestra la carta de viscosidad del asfalto.

Figura 6.

Carta de viscosidad del asfalto.

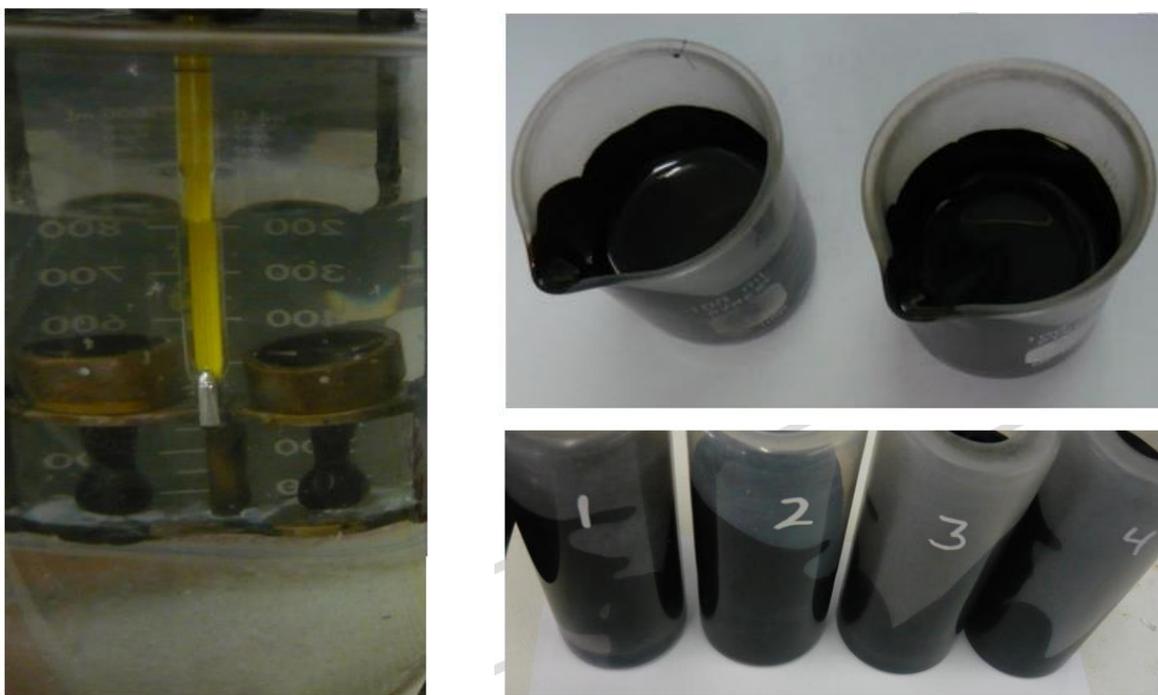


Fuente: SELYCC S.A DE C.V

A continuación, se muestran imágenes de la realización de las pruebas de calidad del cemento asfáltico PG 70 -22:

Figura 7.

Pruebas de calidad del cemento asfáltico.



Fuente: SUCOBISA S.A DE C.V

Ahora bien, se dan a conocer los resultados obtenidos de la prueba Marshall (véase la tabla 10):

Tabla 10.
Hoja de cálculo de la prueba Marshall.

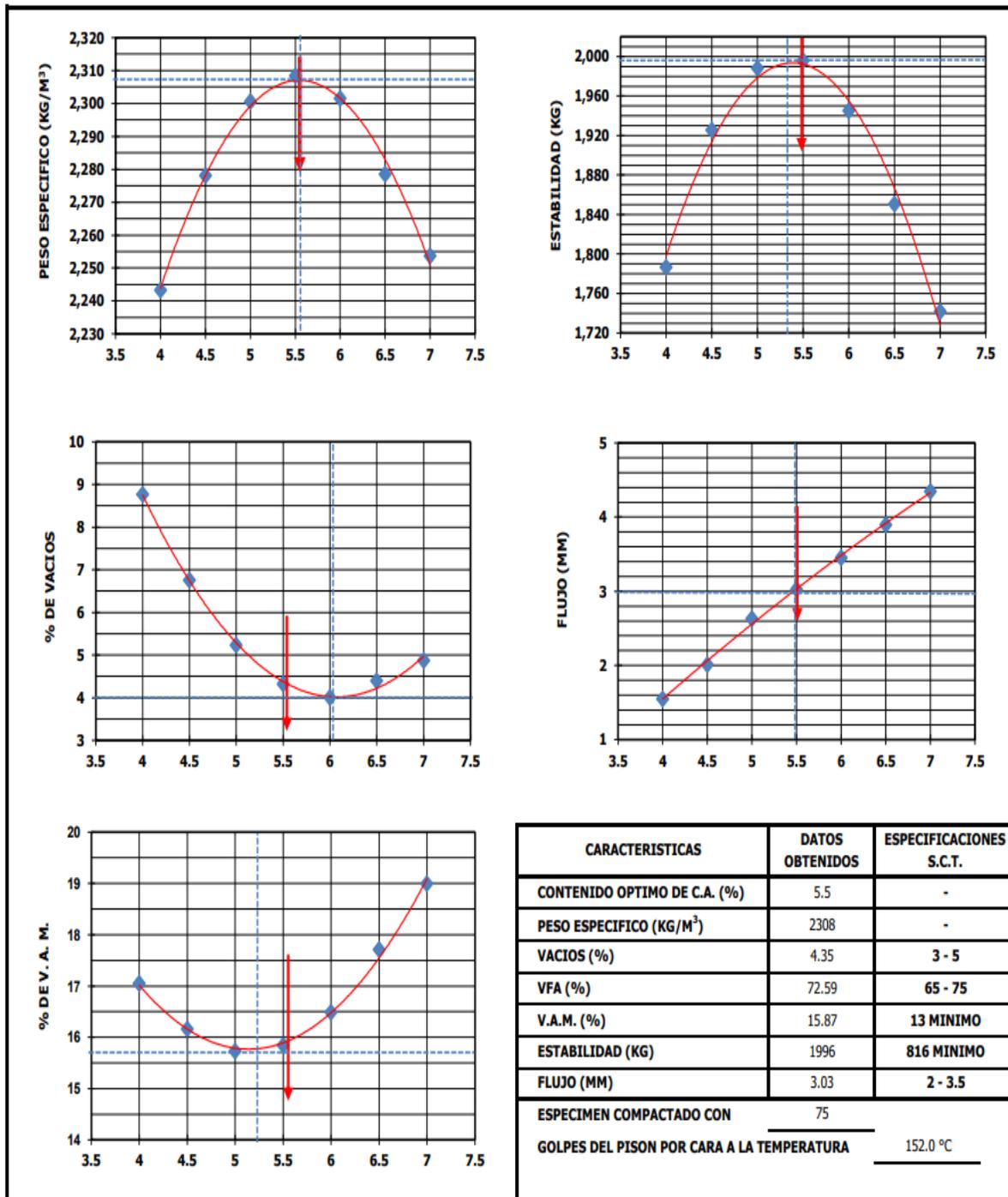
ENSAJE No.	PROBETA No.	% DE C.A. EN PESO										VOLUMEN ESPECIMEN (cm ³)										PESO VOLUMET. (Kg/m ³)	DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA (Kg/m ³)	VOLUMEN % TOTAL				% VACIOS				LECTURA MICRÓMETRO		ALTURA ESPECIMEN (Cm.)		ESTABILIDAD (Kg.)		FACTOR DE CORREC.		ESTABILIDAD CORREGIDA (Kg.)		FLUIDO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T			U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	JJ	JK	JL	JM	JN	JO	JP	JQ	JR	JS	JT	JU	JV	JW	JX	JY	JZ	KA	KB	KC	KD	KE	KF	KG	KH	KI	KJ	KK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LL	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NM	NN	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	XG	XH	XI	XJ	XK	XL	XM	XN	XO	XP	XQ	XR	XS	XT	XU	XV	XW	XX	XY	XZ	YA	YB	YC	YD	YE	YF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV
5	1	4.0	3.85	1202.6	1199.5	664.7	3.1	537.9	2.83	538.1	2242	2.512	8.27	82.90	8.83	17.10	48.35	1795	6.38	1795	0.992	1781	0.83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
6	2	4.0	3.85	1187.0	1184.5	658.2	2.5	528.8	2.28	526.5	2250	2.503	8.30	83.20	8.51	16.80	49.37	1796	6.35	1796	0.998	1792	1.81																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
7	3	4.0	3.85	1184.9	1182.2	654.2	2.7	530.7	2.47	528.2	2238	2.517	8.25	82.76	8.98	17.24	47.88	1790	6.35	1790	0.998	1786	2.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2243	2.511	8.27	82.95	8.77	17.05	48.53						1786	1.55																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8	1	4.5	4.31	1153.1	1150.5	643.8	2.6	509.3	2.37	506.9	2270	2.433	9.37	83.53	7.10	16.47	56.88	1933	6.34	1933	1.000	1933	2.05																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
9	2	4.5	4.31	1158.2	1155.0	646.6	3.2	511.6	2.92	508.7	2271	2.432	9.37	83.57	7.06	16.43	57.04	1938	6.38	1930	0.992	1915	2.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
10	3	4.5	4.31	1153.1	1151.2	649.5	1.9	503.6	1.74	501.9	2294	2.407	9.47	84.42	6.11	15.58	60.79	1932	6.35	1932	0.998	1928	1.99																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2278	2.424	9.40	83.84	6.76	16.16	58.24						1925	2.01																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
11	1	5.0	4.76	1162.9	1160.8	656.8	2.1	506.1	1.92	504.2	2302	2.353	10.50	84.34	5.17	15.66	67.02	1990	6.35	1990	0.998	1986	2.66																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
12	2	5.0	4.76	1163.1	1160.0	655.3	3.1	507.8	2.83	505.0	2297	2.359	10.47	84.15	5.38	15.85	66.07	1992	6.34	1992	1.000	1992	2.63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
13	3	5.0	4.76	1168.1	1166.0	659.7	2.1	508.4	1.92	506.5	2302	2.354	10.50	84.33	5.17	15.67	66.98	1994	6.36	1994	0.996	1986	2.62																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2301	2.355	10.49	84.27	5.24	15.73	66.69						1988	2.64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
14	1	5.5	5.21	1181.7	1179.5	670.8	2.2	510.9	2.01	508.9	2318	2.295	11.57	84.50	3.93	15.50	74.63	1999	6.35	1999	0.998	1995	3.00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
15	2	5.5	5.21	1177.9	1175.0	663.4	2.9	514.5	2.65	511.9	2296	2.317	11.46	83.69	4.85	16.31	70.25	1995	6.36	1995	0.996	1987	3.06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
16	3	5.5	5.21	1188.3	1185.3	672.8	3.0	515.5	2.74	512.8	2312	2.301	11.54	84.28	4.19	15.72	73.36	2009	6.35	2009	0.998	2005	3.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2308	2.304	11.52	84.16	4.32	15.84	72.75						1996	3.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
17	1	6.0	5.66	1180.7	1178.3	670.4	2.4	510.3	2.19	508.1	2319	2.252	12.57	84.14	3.28	15.86	79.29	1955	6.37	1955	0.994	1943	3.43																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
18	2	6.0	5.66	1183.3	1180.4	668.1	2.9	515.2	2.65	512.6	2303	2.268	12.49	83.56	3.95	16.44	75.96	1952	6.35	1952	0.998	1948	3.47																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
19	3	6.0	5.66	1188.4	1185.3	666.3	3.1	522.1	2.83	519.3	2283	2.288	12.38	82.82	4.80	17.18	72.05	1956	6.37	1956	0.994	1944	3.46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2302	2.269	12.48	83.51	4.01	16.49	75.77						1945	3.45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
20	1	6.5	6.10	1247.1	1245.2	698.4	1.9	548.7	1.74	547.0	2277	2.294	13.30	82.22	4.48	17.78	74.81	1850	6.38	1850	0.992	1835	3.91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
21	2	6.5	6.10	1250.3	1247.2	699.8	3.1	550.5	2.83	547.7	2277	2.253	13.31	82.25	4.45	17.75	74.94	1862	6.36	1862	0.996	1855	3.90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
22	3	6.5	6.10	1250.9	1248.9	701.7	2.0	549.2	1.83	547.4	2282	2.249	13.33	82.40	4.27	17.60	75.75	1865	6.35	1865	0.998	1861	3.88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2278	2.252	13.31	82.29	4.40	17.71	75.17						1850	3.90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
23	1	7.0	6.54	1260.3	1258.2	699.1	2.1	561.2	1.92	559.3	2250	2.242	14.09	80.87	5.04	19.13	73.66	1749	6.36	1749	0.998	1746	4.34																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
24	2	7.0	6.54	1264.4	1261.2	702.5	3.2	561.9	2.92	559.0	2256	2.236	14.13	81.10	4.76	18.90	74.80	1738	6.36	1738	0.998	1735	4.36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
25	3	7.0	6.54	1267.8	1264.9	704.2	2.9	563.6	2.65	561.0	2255	2.237	14.13	81.06	4.82	18.94	74.56	1756	6.38	1756	0.994	1745	4.35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											2254	2.238	14.12	81.01	4.87	18.99	74.34						1742	4.35																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos anteriormente se obtienen cinco graficas que representan la variación de estabilidad, flujo, densidad, vacíos en la mezcla asfáltica y vacíos en el agregado mineral; en función del contenido de cemento asfáltico.

Tabla 11.

Gráficas de la prueba Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se ilustran imágenes del proceso de aplicación de la prueba Marshall:

Figura 8.

Pesaje de mezcla asfáltica antes de colocarlo en la probeta.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodriguez Guillen Galo (2024).

Figura 9.

Colocación de la mezcla asfáltica dentro del molde.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodriguez Guillen Galo (2024).

Figura 10.

Compactación de la mezcla asfáltica con 75 golpes por cara.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodriguez Guillen Galo (2024).

Figura 11.
Cálculo de los espesores de las pastillas cilíndricas.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodríguez Guillen Galo (2024).

Figura 12.
Medición del peso de las pastillas cilíndricas.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodríguez Guillen Galo (2024).

Figura 13.
Prueba Marshall, aplicación de carga a la probeta hasta llegar al fallo.



Fuente: Fotografía formato JPG, Rodríguez Guillen Galo (2024).

3.1 Discusión.

En este apartado se analizará los datos obtenidos que se mencionaron anteriormente.

Primero analizaremos los datos de la tabla 6. Resultados de granulometría y calidades de los materiales pétreos del banco "CIACAS". Se observa que los materiales pétreos cumplen con la granulometría, se obtuvo una curva granulométrica dentro de los límites superior e inferior, también cumple con las calidades requeridas para su empleo en carpetas asfálticas en caliente, de acuerdo a las especificaciones de la normativa: N-CMT-4-04/17.

En segundo lugar, analizaremos los datos de la tabla 6.1 Resultados de la caracterización del cemento asfáltico PG 70 -22. Se observa que el cemento asfáltico cumple con los requisitos para su empleo para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente de acuerdo a la normativa: N-CMT-4-05-004/18.

En tercer lugar, analizaremos los datos de la tabla 6.2 Hoja de cálculo de la prueba Marshall. Se puede observar lo siguiente:

- ✓ La menor deformación (flujo) se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 4.0 %, mientras que la mayor deformación se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 7.0 %.
- ✓ La mayor estabilidad obtenida es en la probeta con un contenido asfáltico de 5.5 %, mientras que la menor estabilidad se encuentra en la probeta con un contenido asfáltico de 7.0 %.
- ✓ El mayor vacío en el agregado mineral (VAM) se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 7.0 %, mientras que el menor se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 5.0 %.
- ✓ El mayor volumen de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 4.0 %, mientras que el menor volumen de vacíos de aire se presenta en la probeta con un contenido asfáltico de 6.0 %.

En cuarto lugar, analizaremos la tabla 6.3 Gráficas de la prueba Marshall. Se puede observar de una manera más clara y precisa los datos obtenidos en la ejecución de la prueba, es importante mencionar los siguientes puntos:

- ✓ Gráfica peso específico – contenido asfáltico, se observa mayor valor del peso específico entre 5.5 % y 5.6 % de contenido asfáltico. Se consideró el peso específico de 2,308 kg/m³ con C.A de 5.5%.
- ✓ Gráfica vacíos en el agregado mineral – contenido asfáltico, se observa menor vacíos en el agregado mineral para un C.A de 5%. Se consideró los vacíos de 15.87 con un C.A de 5.5 %.
- ✓ Gráfica flujo – contenido asfáltico, se observa la menor deformación para un C.A de 4%. Se consideró la deformación de 3.03 mm con un C.A de 5.5 %.
- ✓ Gráfica estabilidad – contenido asfáltico, se observa la mayor estabilidad para un C.A de 5.4 % Y 5.5 %. Se consideró la estabilidad de 1,996 kg para un C.A de 5.5 %.
- ✓ Gráfica vacíos de aire – contenido asfáltico, se observa el menor vacíos de aire para un C.A de 6%. Se consideró los vacíos de 4.35 % con un C.A de 5.5 %.

Es importante mencionar que el contenido de cemento asfáltico elegido es de acuerdo al criterio de menor costo en la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, debido a que entre mayor sea el C.A se incrementan los costos de su producción.

Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye mencionando lo siguiente:

Las características físicas obtenidas de los materiales pétreos del banco "CIACAS" (gravas y arenas), cumplen con los requisitos para su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, de acuerdo con la normativa: N-CMT-4-04/17; con lo mencionado se afirma el cumplimiento del segundo objetivo específico de la investigación.

Se observó que los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización del cemento asfáltico utilizado PG 70 -22, cumple con los requisitos para su empleo en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. El grado del asfalto clasificación PG (Grado de Desempeño), se determinó de acuerdo a la normativa: N-CMT-4-05-004/08; con lo expuesto se afirma el cumplimiento del tercer objetivo específico de la investigación.

Los resultados son de gran importancia, ya que permitieron evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla asfáltica en caliente, de acuerdo a los ensayos de las diferentes muestras de mezclas asfálticas analizadas por el método Marshall, cumpliendo con el objetivo general de la investigación.

En cuanto a la granulometría propuesta (40 % gravas, 40 % arenas y 20 % finos), se observó que cumple con los requisitos de la normativa vigente de la SCT. Con la elaboración de las probetas cilíndricas utilizando la granulometría mencionada y con diferentes contenidos de cemento asfáltico (4.0 %, 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 % y 7.0 %), para la aplicación de la prueba Marshall; se determinó los parámetros de peso volumétrico, estabilidad (carga máxima), flujo (deformación), vacíos en el agregado mineral, vacíos ocupados por el cemento asfáltico y vacíos en la mezcla. Obteniendo así los datos para ser comparados con las especificaciones para tráfico pesado que establece la normativa de la SCT, el resultado final de la investigación demuestra que con una proporción de agregados pétreos que se propuso y contenido óptimo de asfalto del 5.5%, se logra cumplir con parámetros anteriormente mencionados.

. Con lo expuesto se da respuesta a los objetivos específicos, la hipótesis y el planteamiento general del problema de la investigación.

Se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales posteriores al estudio presentado. Es de suma importancia poder darle una continuidad a este presente trabajo de investigación mediante pruebas en algunos tramos carreteros. Esto permitirá la evaluación que tendrá la mezcla asfáltica diseñada utilizando el método Marshall en este estudio. De esta manera, se podrá observar cómo se comporta frente a las cargas de tránsito y las condiciones climáticas a las que estará expuesta en el tramo estudiado.

Por último, se recomienda realizar nuevas investigaciones con materiales pétreos diferentes al utilizado en el presente trabajo de investigación, con materiales pétreos de la región, tal es el caso de poder realizar pruebas con materiales pétreos calizos; este tipo de materiales son obtenidos mediante la explotación de bancos de mina a cielo abierto; la finalidad de realizar esta nueva investigación es poder analizar y comparar datos de caracterización para dar a conocer que material pétreo tiene mejor comportamiento mecánico y volumétrico para su recomendación en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Referencias

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Los caminos de México, un recorrido historico. El Mirador .<https://elmirador.sct.gob.mx/manos-a-la-obra/los-caminos-en-mexico-un-recorrido-historico>.

Manuel Tinoco, (2011). Aplicación y revisión del protocolo AMAAC 2008 mediante el análisis del estado del arte de las mezclas asfálticas y el seguimiento del tramo de prueba Sta. Rosa a la Barca del km 13 al 17 [**Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**].
http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/3063/FIC-M-2011-0050.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Paul, G.A., Horacio, D., y Carlos, S. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas.
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt271.pdf>

Padilla Rodriguez, (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista [Tesina, Universidad Politécnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>

David Humberto, A.G. (2022). Caracterización de agregados pétreos para mezclas asfálticas mediante análisis petrográficos y procesamiento de imágenes [**Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia**].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81603/1018433994.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). (Normativa. Características de los materiales. 4. Materiales para pavimentos. 04. Materiales pétreos para mezclas asfálticas). N-CMT-4-04/17. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 04 Materiales pétreos para mezclas asfálticas. 002 Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-002/02. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 003 Densidades relativas y absorción de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-003/18. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 006 Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-006/02. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2023). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 007 Resistencia a la degradación por abrasión del material pétreo con la máquina micro-deval). M-MMP-4-04-007/23. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 008 Interperismo acelerado de los materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-008/03. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2008). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos.005 Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-005/08. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2009). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 013 Partículas trituradas de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-013/09. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2003). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 009 Desprendimiento por fricción en materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-009/03. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Horacio, D.A., Paul, G., Gilber Mario, V., y Giovanni, R. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt299.pdf>

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2016). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 004 Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-004/16.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2009). (Manual. Métodos de muestreo y prueba de materiales. 4 Materiales para pavimentos. 014 Azul de metileno de materiales pétreos para mezclas asfálticas). M-MMP-4-04-014/09. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2022). (Normativa. Características de los materiales. 4 Materiales para pavimentos. 05 Materiales asfálticos, aditivos y

mezclas. 001 Calidad de materiales asfálticos). N-CMT-4-05-001/22.
<https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2008). (Normativa. Características de los materiales. 4 Materiales para pavimentos. 05 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. 004 Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño PG). N-CMT-4-05-004/08. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2008). (Normativa. Características de los materiales. 4 Materiales para pavimentos. 05 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. 004 Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño PG). N-CMT-4-05-004/08. <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2016). N-CMT-4-05-003/16 (Normativa. Características de los materiales. 4 Materiales para pavimentos. 05 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. 003 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras). <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html>.

Evolym Jessenia., V. M., (2019). Efecto de la temperatura de mezcla-compactación y la distancia de transporte en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente en la región centro [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5643/5/IV_FIN_105_TE_Vargas_Malpartida_2019.pdf