



# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

Facultad de Ingeniería

COLEGIO DE INGENIERÍA CIVIL

## **SELECCIÓN DE LIGANTE ASFALTICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAPA DE ALTO MODULO - INTERCAPA DE TRANSICIÓN (CAMIT).**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

Presenta:

**SAUL SAMIR ORDAZ RUIZ**

Asesor de tesis:

M.I. Raúl David González Padilla

Coasesor de tesis:

M.I. Eymard Ávila Vázquez

Puebla, Pue.

Febrero 2020



# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

COLEGIO DE INGENIERÍA CIVIL

## **SELECCIÓN DE LIGANTE ASFALTICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAPA DE ALTO MODULO-INTERCAPA DE TRANSICIÓN (CAMIT).**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

Presenta:

**SAUL SAMIR ORDAZ RUIZ**

Asesor de tesis:

M.I. Raúl David González Padilla

Coasesor de tesis:

M.I. Eymard Ávila Vázquez

## DEDICATORIAS

*La presente tesis está dedicada en primer lugar a Dios, por ser quien me ha puesto en esta tierra y me ha dado la capacidad de crecer en todos los ámbitos de mi vida, cuidando cada paso que doy.*

*A esos amigos que he ido reuniendo en cada etapa de mi vida, esos que están en las fiestas y alegrías, como en los momentos más tristes y difíciles.*

*A mis grandes y bastas familias, Ordaz y Ruiz, que siempre están presente en mis altas y bajas.*

*A mis asesores M.I. Raúl David González Padilla y M.I. Eymard Ávila Vázquez que desde que decidí tomar este proyecto no me negaron su apoyo*

*Al M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez, por su confianza, el apoyo y amistad que desde que nos conocimos me ha brindado.*

*A mis abuelos maternos, Leonardo Ruiz Molina y Magdalena Montes Caiseros, y mis abuelos paternos, Antonio Ordaz Tepale y Lidia Aguilar Huitzil. Siempre estarán a mi lado.*

*Toda gran construcción necesita una gran cimentación, ustedes son y serán siempre la base principal de toda mi vida, esta tesis es dedicada principalmente a ustedes mis compañeros de vida mis amores, mis padres; Emi Leticia Ruiz Montes y Julio Ordaz Aguilar.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Facultad de Ingeniería BUAP y su comunidad universitaria, en sus pasillos se vive y respira amistad, cariño, esfuerzo, y sobre todo alegría, y eso siempre estará presente.*

*A la empresa Ergon asfaltos México S de RL de CV, por abrirme las puertas y dejarme realizar esta investigación en sus instalaciones, así como a todos los compañeros del laboratorio técnico de mezclas que me enseñaron a realizar las pruebas que necesite.*

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	2
Hipótesis de la investigación .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos particulares. ....	3
<b>Capítulo I: Historia, definición y clasificación de Pavimentos flexibles</b> .....	4
1.1) Pavimentos Flexibles.....	5
1.1.1) a) Historia y evolución de los pavimentos flexibles y la aplicación de cementos asfálticos 5	
1.1.2) Definición .....	8
1.1.3) Clasificación de los pavimentos flexibles. ....	8
1.1.4) Proceso de elaboración.....	10
1.2) Asfalto: Definición y clasificación.....	11
1.3) Pavimentos Perpetuos o de larga duración. ....	12
1.4) Diseño de carpetas asfálticas en caliente. ....	15
1.4.1) Método Marshall.....	16
1.4.2) Método Hveem .....	16
1.4.3) Método Superpave.....	17
1.4.4) Método del Protocolo AMAAC.....	18
<b>Capítulo 2: Fallas y revisión de esfuerzos</b> .....	25
2.1) Cargas y esfuerzos principales. ....	25
2.2) Estados de falla. ....	28
2.2.1) Fisuras y grietas por fatigamiento.....	29
2.2.2) Fisuras y grietas en bloque.....	30
2.2.3) Grietas en borde.....	31
2.2.4) Fisuras y grietas longitudinales y transversales .....	32
2.2.5) Baches abiertos .....	33
2.2.6) Baches o cortes reparados .....	34
2.2.7) Roderas.....	35
2.2.8) Meteorización, desprendimiento o desgaste. ....	36
2.3) Evaluación de esfuerzos principales por el método de Protocolo AMAAC.....	37
2.3.1) Susceptibilidad a la Humedad (TSR).....	37

2.3.2)	Susceptibilidad a la deformación Permanente .....	39
2.3.3)	Modulo Dinámico.....	41
2.3.4)	Fatiga.....	45
<b>Capítulo 3: Desarrollo Experimental .....</b>		<b>49</b>
3.1)	Agregado Pétreo .....	49
3.1.1)	Muestreo Antes de iniciar todas las pruebas al agregado pétreo fue necesario reducir las muestras por cuarteo; en este caso se usó una cuarteadora metálica y se redujo la muestra de 0.095 m <sup>3</sup> hasta solo usar una cuarta parte de ésta.....	50
3.1.2)	Peso volumétrico del agregado grueso.....	50
3.1.3)	Peso volumétrico del agregado fino .....	51
3.1.4)	Densidad del agregado Grueso. ....	52
3.1.5)	Densidad del agregado Fino.....	53
3.1.6)	Desgaste de los Ángeles .....	55
3.1.7)	Microdeval.....	57
3.1.8)	Partículas planas y alargadas.....	58
3.1.9)	Caras fracturadas .....	59
3.1.10)	Equivalente de Arena .....	60
3.1.11)	Azul de metileno.....	62
3.1.12)	Angularidad del agregado fino. ....	63
3.1.13)	Granulometría del agregado grueso y fino. ....	65
3.2)	Cemento asfaltico .....	66
3.3)	Diseño Volumétrico.....	67
3.3.1)	Elaboración de mezclas .....	67
3.3.2)	Gravedad teórica suelta (Gmm).....	69
3.3.3)	Compactación de especímenes y cálculo de contenido óptimo de asfalto. ....	70
3.3.4)	Gmb.....	71
3.4)	Módulo Dinámico.....	73
3.5)	Prueba de Fatiga.....	74
4.1)	Resumen de resultados del análisis de propiedades físicas de agregados pétreos.....	76
4.2)	Granulometría agregado fino y grueso. ....	76
4.3)	Diseño volumétrico. ....	78
4.4)	Modulo Dinámico.....	80
4.5)	Fatiga.....	81
<b>Bibliografía.....</b>		<b>86</b>

## RESUMEN

Los pavimentos asfálticos flexibles son diseñados para que su comportamiento mecánico sea el adecuado para resistir los esfuerzos principales a los que se verá sometido durante la vida útil proyectada. En los pavimentos los fenómenos comunes de deformación permanente y fatiga son considerado como las fallas principales durante el diseño.

El objetivo de este estudio es la evaluación de diferentes productos asfálticos en la producción de mezclas asfálticas para conocer las respuestas mecánicas a deformación permanente y fatiga para el desarrollo de un prototipo que posea ambas características de resistencia superiores a las convencionales a dichos fenómenos. Esta mezcla final será considerada como parte del pavimento con funciones de una intercapa asfáltica de comportamiento mejorado de rigidez y flexibilidad (CAMIT).

Cuatro tipos de asfalto fueron empleados para la elaboración de las mezclas evaluadas: asfalto sin modificar (AC-20), dos asfaltos modificados con polímero usados en el mercado actual y un asfalto modificado con polímero prototipo. Un agregado pétreo de origen basáltico fue seleccionado para el estudio. El Protocolo AMAAC fue seguida para la ejecución de los diferentes ensayos en los agregados pétreos y en la mezcla asfáltica.

Los resultados mostraron que las mezclas elaboradas con asfalto sin modificar (AC-20) presentaron el desempeño más pobre en los dos tipos de falla considerados. Las mezclas con asfaltos modificados con polímero mostraron proveer un desempeño mayor que una mezcla convencional, aunque con el asfalto prototipo fue posible incrementar aún más este desempeño: un módulo dinámico mayor a 8,000 MPa y una vida a fatiga de aproximadamente de 20,000,000 de repeticiones de carga a 400  $\mu$ m. Lo anterior permite establecer la factibilidad de obtener un producto con características mejoradas para elevar la vida útil de los pavimentos.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad y desde tiempo atrás se ha usado el asfalto para la construcción de caminos por sus características aglutinantes y su favorable desempeño a temperaturas altas y bajas, primero siendo obtenido de bancos naturales, y más adelante por medio del destilado de petróleo crudo. Este material actualmente se desarrolla y se mejora usando diferentes materiales o procedimientos que los hacen más rígidos o más flexibles, resistentes a altas temperaturas o a bajas temperaturas, haciéndolos favorables para la mezcla asfáltica que necesaria para las características del proyecto a ejecutar.

Con el desarrollo y mejoría de este material, también se han desarrollado nuevas maneras de construir una carpeta asfáltica. En este proyecto se toma la idea de los pavimentos perpetuos, los cuales son un sistema de construcción de carpeta en el que se necesitan tres capas de mezcla asfáltica; una resistente a los esfuerzos en tensión, otra resistente a los esfuerzos en compresión y la última una capa de rodadura o de desgaste. Cada una de estas capas usa un asfalto distinto, que trabaja en conjunto para que la estructura de la carpeta tenga una vida útil larga, y lo único que se reemplace sea la capa de rodadura sin afectar las otras dos.

Debemos considerar que la carpeta asfáltica es la capa más superficial, por lo que cuando se presenta algún tipo de falla en el pavimento provocada por los esfuerzos del tránsito vehicular, esta empieza a deteriorarse, causando malestar en el conductor y en el mismo flujo del tránsito.

Para que se puedan evitar lo más posible estas fallas, la mezcla asfáltica se pone a examinar en pruebas que analicen su rendimiento cuando se presenten esfuerzos a compresión y tensión.

El protocolo AMAAC se usó desde el análisis de las características del agregado pétreo y el mezclado de las muestras, ya que, dependiendo del nivel escogido y el tipo de mezcla que se elige para el proyecto, se harán las pruebas correspondientes para conocer el rendimiento de la mezcla. Para esta investigación se escogió el nivel IV de diseño, en este se efectúan la prueba de Modulo Dinámico, que analiza el

rendimiento de una mezcla asfáltica a compresión axial en diferentes temperaturas y frecuencias de compresión, y la evaluación de viga fatiga, la cual analiza la resistencia de la mezcla a esfuerzos de tensión a temperaturas y frecuencias distintas.

#### Hipótesis de la investigación

Un cemento asfáltico puede desarrollarse para la fabricación de mezcla asfáltica con características de alto desempeño a la deformación permanente y fatiga.

La mezcla asfáltica Carpeta Alto Módulo Intercapa de Transición (CAMIT) será capaz de resistir cargas mayores a un asfalto convencional en la prueba de modulo dinámico de compresión axial, así también contará con una alta resistencia a la fatiga reduciendo los espesores de la carpeta asfáltica.

#### Objetivo General.

El objetivo de este trabajo es demostrar que una mezcla asfáltica en caliente es capaz de soportar las cargas producidas por un alto tránsito en carreteras, disminuyendo el espesor de la carpeta asfáltica sin afectar el rendimiento de la misma. Para comprobar esto se usará el protocolo AMAAC (Asociación Mexicana de Asfaltos, A.C.), como procedimiento experimental.

#### Objetivos particulares.

Llevar a cabo cada paso para estudiar una mezcla asfáltica por medio del Protocolo AMAAC nivel IV.

- Conocer las propiedades químicas y mecánicas del asfalto propuesto.
- Que el asfalto prototipo al ser mezclado con el agregado pétreo tenga una resistencia mayor a 8000 MPa en la prueba de módulo dinámico.
- La mezcla al aumentar su rigidez no reduzca su capacidad de resistencia a la tensión.

## **Capítulo I: Historia, definición y clasificación de Pavimentos flexibles**

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. (Fonseca, 2002). Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Un pavimento debe reunir ciertas características que lo hagan apropiado para su uso en carreteras, éstas son:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperización.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

En el área de ingeniería los pavimentos se pueden clasificar en dos grandes grupos: Pavimentos Flexibles y Pavimentos Rígidos. Los primeros tienen como

característica principal el uso de materiales bituminosos como adherente, mientras que los segundos son hechos de concreto hidráulico (Fonseca, 2002).

## 1.1) Pavimentos Flexibles

### 1.1.1) a) Historia y evolución de los pavimentos flexibles y la aplicación de cementos asfálticos

La construcción de carreteras y otras vías de comunicación siempre ha sido uno de los símbolos más importantes de toda civilización avanzada, desde los primeros tiempos, ya que eran necesarias para suministrar alimentos o comerciarlos con otras poblaciones. En siglos posteriores, tras la invención de la rueda y de las grandes civilizaciones, las necesidades militares impulsaron la construcción de caminos carreteros, al igual y como ocurrió en otras etapas de la humanidad. La historia testifica que los grandes constructores de caminos de la historia antigua fueron los romanos, ya que construyeron una red de caminos muy eficiente, inclusive comparada con las redes de caminos actuales y que contaba con 80,000 kilómetros de longitud. La sección tipo de un camino romano consistía en:

- Un cimientado de piedras planas denominado *statumen*.
- Una capa formada por ripios y detritus de cantera, llamada *rudus*.
- Una capa intermedia de hormigón a base de piedra machacada y cal grasa, llamada núcleos.
- Una capa de terminación, formada por un enlosado de piedra sellado con mortero de cal, denominada summum *dorsum*.

También se atribuye a los romanos la adopción de normas relativas a la construcción, conservación, rehabilitación y operación de los caminos, llegando a establecer medidas para el uso, mantenimiento del tránsito y prevenir el deterioro de los caminos públicos.

Las carreteras especiales se empezaron a construir en Gran Bretaña en el transcurso de los años veinte, mediante empresas privadas que amortizaban su inversión cobrando cuotas de peaje, debiendo a esto su falta de popularidad.

En México, los indígenas construyeron caminos entre diferentes poblados, mercados y centros ceremoniales para el tránsito de viajeros. Las veredas y senderos fueron de menor importancia y normalmente se localizaban con el recorrido que seguían los individuos, no así los caminos, calzadas y avenidas que constituyeron obras de ingeniería muy importantes y que se relacionaban con los sistemas calendáricos establecidos a partir de las observaciones astronómicas. Los caminos prehispánicos de la antigua Mesoamérica fueron solamente hechos de tierra compacta, rellenos de piedras y bastante limitados por la vegetación circundante. El sistema de caminos de Mesoamérica fue creado a lo largo de cientos de siglos con base a la experiencia y en el conocimiento de la geografía. En el México Antiguo había principalmente dos tipos de caminos, los primeros eran construidos con el objetivo de unir un sitio con otros. Los segundos conectaban a diferentes regiones y tenían como propósito permitir viajes a larga distancia, partiendo desde los principales asentamientos de Mesoamérica, convirtiéndose en verdaderos ejes de desarrollo prehispánico.

En los siglos XVII y XVIII, la Nueva España contaba con numerosos caminos de diferente capacidad y longitud. Algunas rutas como las del centro y sur del Virreinato aparecieron debido a la necesidad de llevar a cabo el intercambio regional de productos. Para finales del siglo XVIII se calcula con dificultades que pudo haber entre 24000 y 26000 kilómetros de caminos en la Nueva España, cuyo mantenimiento estaba a cargo de los ayuntamientos de los pueblos, los cuales lo hacían poco o casi nada para conservarlos.

En cuanto a los pavimentos asfálticos o flexibles tenemos que hablar acerca de su principal componente; el asfalto. Este es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. En el sector de la construcción, la utilización más antigua se remonta aproximadamente al año 3200 A.C. Excavaciones efectuadas en TellAsmer, a 80 km al noreste de Bagdad, permitieron constatar que los sumerios habían utilizado un *mastic* de asfalto para la construcción. Dicho *mastic*, compuesto por betún, finos minerales y paja, se utilizaba en la pega de ladrillos o mampuestos, en la realización de pavimentos interiores (de 3 a 6 cm de espesor), para

tratamientos superficiales externos de protección y como revestimiento impermeable en los baños públicos. El betún natural fue descubierto a mediados del siglo XVI, en la Isla de Trinidad, por Cristóbal Colón. Un siglo más tarde, Sir Walter Raleigh quedó asombrado ante este Lago de Betún y tomó posesión de él para la Corona Británica. Se puede considerar que el 19 de agosto de 1681, abrió una nueva era para los ligantes hidrocarbonados, dado que los ingleses Joakin Becher y Henry Serie registraron una patente relativa a “un nuevo método para extraer brea y alquitrán del carbón de piedra”, Mientras tanto, en 1712, el griego Eirini D'Eyrinis hizo otro descubrimiento: el yacimiento de asfalto de Va de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle del Ródano. A partir de estos yacimientos se elaboró el “*mastic* de asfalto”, aplicado a revestimientos de caminos y senderos. Las primeras aplicaciones tuvieron lugar en las afueras de Burdeos y en Lyon.

En 1824, la firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines se asfalto, que en 1837 se utilizaron para pavimentar la Plaza de la Concordia y los Campos Elíseos en París. En 1852, la construcción de la carretera Paris-Perpiñan utilizó el asfalto de Val Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial. En 1869, se introduce el procedimiento en Londres (con asfalto de Val de Travers), y en 1870 en los Estados Unidos con similar ligante. Desde esta época, el “asfalto” se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició significativamente su uso vial. La construcción del primer pavimento, tipo *Sheet Asphalt*, ocurre en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado. En 1900 aparece la primera mezcla asfáltica en caliente, utilizada en la rue du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue confeccionada con asfalto natural de la Isla de Trinidad. A partir del año 1902, se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, que por sus características de pureza y economía en relación a los asfaltos naturales.

Este material desgraciadamente suele ser presentar un deterioro por esa razón se ha tratado de mejorar las características usando polímeros o aditivos de diferentes fuentes. La idea de modificar asfalto data desde el año 1840 donde se empleaban

polímeros para diferentes actividades específicas. En Estados Unidos también surgió la inquietud de combinar el asfalto con polímeros o aditivos llevándose a cabo los primeros proyectos en 1960. En esa década se construyeron en Londres más de 1,000 kilómetros de carreteras usando este tipo de asfaltos, los cuales eran a base seca o látex. Después de estos años se continuó usando estos asfaltos, sin embargo, el conocimiento científico sobre los mecanismos de incorporación de los polímeros a los asfaltos era desconocido. En ese sentido, se comenzó a investigar y estudiar las relaciones, composición, micro morfología, las propiedades físico-mecánicas, entre otras cosas, de estas mezclas para superar el conocimiento semi-empírico que se tenía en esos tiempos. Hasta nuestros días se continúan haciendo investigaciones acerca del tema, logrando tipificar los asfaltos modificados y disminuyendo el costo de estos haciéndolos más atractivos para su uso en construcción de carreteras. En muchos países la administración pública ha jugado un papel importante en la investigación de asfaltos modificados fomentando las pruebas y motivando a las empresas privadas a investigar sobre este tema. Y también la administración pública por otra parte, en sus centros de desarrollo ha participado en las investigaciones. (Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres, A.C., 2011)

#### 1.1.2) Definición

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra. (Fonseca, 2002)

#### 1.1.3) Clasificación de los pavimentos flexibles.

Carpetas asfálticas en caliente:

Son las elaboradas en caliente usando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista de equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. Se clasifican a su vez en:

- Mezclas asfálticas de granulometría densa: Es la mezcla asfáltica en caliente uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37,5 mm (1 ½ in) y 9.5mm (3/8 in). Normalmente se utiliza en la construcción de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en re nivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.
- Mezclas asfálticas de granulometría abierta: Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal de 12.5mm (1/2 in) y 6.3mm (1/4 in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tiene función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa.

#### Carpetas asfálticas en frío:

Son las mezclas elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos. Se clasifican en:

- Mezclas asfálticas de granulometría densa: Es la mezcla asfáltica en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfaltos rebajados y materiales pétreos con tamaño nominal entre 37.5mm (1 ½ in) y 9.5mm. Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad de tránsito ( $\Sigma L$ ) es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una resistencia estructural alta, para la construcción de pavimentos nuevos y carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes así como para la reparación de baches. (SCT, 2006)
- Mortero Asfáltico: Es la mezcla asfáltica en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 2.36mm (No. 8). Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura. (SCT, 2006).

#### 1.1.4) Proceso de elaboración

Para las mezclas en caliente el proceso inicia con la selección, limpieza y cribado del material pétreo que se usara en la carpeta, este tiene que pasar por diferentes pruebas de laboratorio para conocer el porcentaje de asfalto que se deberá usar en estos, así también de sus propiedades de abrasión, absorción, adherencia, verificando que cumpla con la normativa vigente. En cuanto al cemento asfáltico que se usara dependerá de las necesidades que el tránsito proyectado tenga en la carretera, al igual que a los materiales pétreos se harán estudios de laboratorio para comprobar que el material se encuentre según la normativa a cargo. Para producir la mezcla asfáltica se deberán calentar los materiales a la temperatura que las especificaciones del cemento asfáltico indique, garantizando la buena adherencia de este con el material pétreo y así también que se produzca una mezcla lo más homogénea posible. Con la mezcla asfáltica lista, se procede al tendido sobre las capas de base hidráulica, la cual ya debe tener un riego de impregnación y uno de ligue, los cuales son realizados con emulsiones asfálticas en dosificaciones según el proyecto lo indique, la mezcla se debe comenzar a extender a una temperatura aun adecuada para que no se pierda su plasticidad y la compactación se realice correctamente, pues si no se tuviera una temperatura apta la carpeta no se compactara lo suficiente provocando vacíos en la carpeta asfáltica los cuales pueden provocar problemas en la estructura del pavimento por filtración de agua, también afectaría los espesores de diseño del pavimento, y todo repercutiendo económicamente en la obra. Terminando la compactación de la carpeta, se puede colocar una capa de rodamiento que proteja la carpeta asfáltica, pero esto dependerá de que el proyecto lo marque o no.

En el caso de las mezclas en frío, se usan emulsiones asfálticas las cuales no necesitan de altas temperaturas para la adherencia con el material pétreo pues la solución jabonosa que se utiliza en la elaboración de emulsiones, en el momento que la mezcla rompe (separación de la parte asfáltica de la jabonosa) el asfalto se adhiere con el material pétreo.

## 1.2) Asfalto: Definición y clasificación.

El asfalto es un hidrocarburo obtenido de depósitos naturales o de la destilación de petróleo crudo. Este material tiene una gran propiedad adhesiva, y tiene una gama de colores que va de café oscuro a negro. La consistencia del asfalto varía de líquido a sólido, el calor que se le aplica es el factor detonante de esta variación es la temperatura que tenga este material, a mayor temperatura el asfalto se vuelve líquido. Este material se clasifica por:

- **Cementos asfálticos:** Son hidrocarburos semisólidos con características fisicoquímicas que lo hacen un buen agente cementante. Son usados generalmente para la construcción de mezclas asfálticas en caliente. Para ser usado en conjunto con agregados pétreos, ambos deben ser calentados a la misma temperatura para asegurar una adherencia adecuada. Por muchas décadas el grado del cemento asfáltico fue designado por la penetración y la viscosidad a una temperatura aplicada.
- **Asfaltos rebajados:** Estos hidrocarburos son obtenidos a partir de la destilación de los cementos asfálticos obtenidos del petróleo crudo. Se dividen en asfaltos de curado lento, curado medio y curado rápido. Son usadas generalmente para tratamientos superficiales como mezcla asfáltica en frío.
- **Emulsiones asfálticas:** Son producidas a partir de romper el asfalto que tienen un rango de penetración de 100 a 250 en partículas diminutas y dispersas en agua con un emulsificante. Estas partículas tienen una carga eléctrica con carga aniónica y catiónica y permanecen en suspensión en la fase líquida siempre que el agua no se evapore. Por lo tanto, una emulsión asfáltica está compuesta por un 55 a 70 por ciento de asfalto, y el demás porcentaje se reparte en agua y un agente emulsificante. Se usan para tratamientos superficiales con mezclas asfálticas en frío. (J. Garber & A. Hoel, 2009)
- **Cementos asfálticos de grado PG (Performance Grade por sus siglas en inglés), o de alto desempeño:** Son aquellos cuyo comportamiento en el pavimento se está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un

desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo. El grado de desempeño o grado PG es el rango de temperaturas máxima y mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud de tránsito a que estará sujeta durante su vida útil. Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64 grados Celsius y tan bajas como -22 grados Celsius. (SCT, 2005)

- Cementos asfálticos modificados: Son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo a cambios de temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia de agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. (SCT, 2006).

### 1.3) Pavimentos Perpetuos o de larga duración.

Un pavimento perpetuo o de larga duración es una estructura compuesta de mezclas asfálticas diseñadas cada una para cumplir un fin específico. Este pavimento a diferencia de convencionales tiene una vida útil relativamente mayor sin una rehabilitación estructural importante. Su aplicación generalmente es en carreteras cuyo volumen de tránsito es alto, Esta estructura de pavimentos tiene poca probabilidad de sufrir problemas como agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba y/o deformación permanente en las capas inferiores y de haber estos problemas, son mínimos. (CINCIRE ROMERO & HERNANDEZ FERNANDEZ )

La estructura de este pavimento se compone de la siguiente manera:

- Capa de rodadura y desgaste
- Capa resistente a roderas (Zona de alta compresión)
- Capa resistente a fatiga (Deformación máxima de tensión)

La primera capa que nos encontramos de manera descendente es la capa de rodadura. Esta debe proteger al pavimento de los agentes climáticos, principalmente de la introducción de agua superficial, así también debe proporcionar una superficie friccionante y funcional para el usuario del camino. En los pavimentos



Ilustración 1.- ESQUEMA DE PAVIMENTO PERPETUO (CINCIRE ROMERO & HERNANDEZ FERNANDEZ)

de larga duración se espera que esta sea la única capa que se esté renovando durante la vida útil del pavimento. (CINCIRE ROMERO & HERNANDEZ FERNANDEZ). En esta se usan diferentes tipos de carpetas, por ejemplo; una Capa Asfáltica Superficial Altamente Adherida (CASAA) que es una mezcla asfáltica de granulometría discontinua con alta fricción interna y resistente a deformaciones, que provee una excelente macro textura y capacidad drenante. También se encuentran las capas *Stone Matrix Asphalt* (SMA), estas compuestas de dos partes: un esqueleto de agregados gruesos y un mortero con alto contenido de cemento asfáltico. El esqueleto proporciona el contacto piedra a piedra en la mezcla asfáltica dándole resistencia, mientras que el mortero proporciona durabilidad. Y también

tenemos las capas *Open Graded Friction Course (OGFC)* estas son una capa asfáltica elaborada en caliente de granulometría abierta (bajo contenido de finos) con alta fricción interna y alta macro textura, drenante y antiderrapante, que disminuye el fenómeno de acuaplaneo y pulverización del agua de lluvia, proporcionando una adecuada fricción. Reduce el nivel del ruido y es de apariencia estética y uniforme de alta seguridad y confort para el usuario, de rápida aplicación y apertura al tránsito. La Normativa vigente SCT las define como capas de rodadura de granulometría abierta.

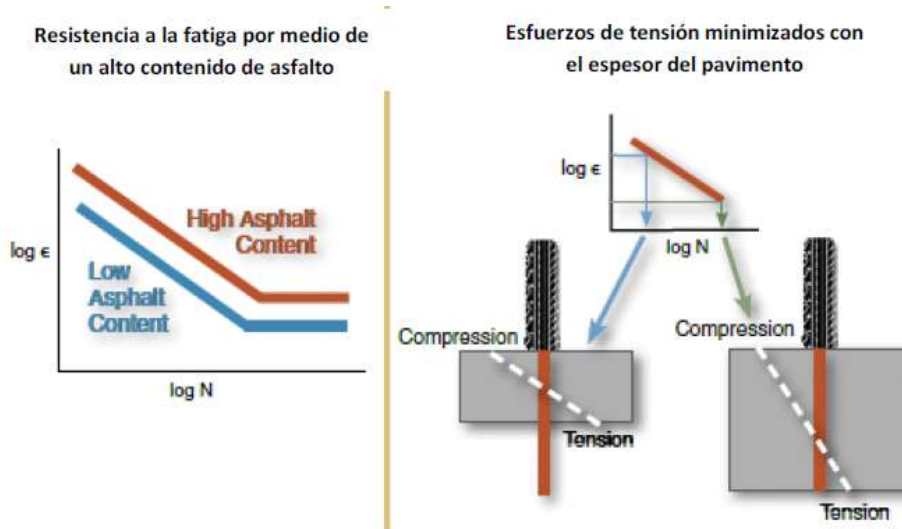


*Ilustración 2; Capa CASAA ya colocada en carretera. Ergon Asfaltos México*

La segunda capa es una capa resistente a roderas, la cual debe soportar las cargas a compresión del tránsito. Usualmente se usa una Capa Alto Modulo (CAM), ya que esta tiene como principal característica un módulo dinámico igual a 8000 MPa, garantizando que la carpeta no sufra daños por roderas. Esta capa utiliza asfalto modificado con polímero tipo I el cual mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas y bajas temperaturas (SCT, 2006). El uso de esta capa y en especial del uso de una CAM se nota al disminuir los espesores de los pavimentos hasta un 30% y con esta también se reducen los esfuerzos que llegan a la subrasante.

Por último, la tercera capa se conoce como Capa Absorbente de Tensión (CAT), esta se diseña para resistir el agrietamiento producido por las cargas repetidas por

el tráfico (Agrietamiento por fatiga) para esto necesita tener una cantidad de asfalto la cual le ayude a tener una mayor flexibilidad. Esto último combinado con el espesor correcto de pavimento, asegura el buen comportamiento del pavimento ante el deterioro de agrietamiento por fatiga. (CINCIRE ROMERO & HERNANDEZ FERNANDEZ).



*Ilustración 3: Comportamiento de la Capa Absorbente de Tensión (CINCIRE ROMERO & HERNANDEZ FERNANDEZ).*

Con estas tres capas, construidas siguiendo la normativa y el control de calidad necesario, se puede garantizar que el pavimento cumpla con la vida útil para lo cual fue proyectado.

#### 1.4) Diseño de carpetas asfálticas en caliente.

Para el diseño de carpetas asfálticas han existido muchos métodos, desde el método empírico hasta los usados en estos tiempos como lo son el método Marshall, el método Hveem, el método de Superpave, y/o el método del protocolo AMAAC (Asociación Mexicana de Asfalto, A.C.) este último es el que se utilizó en el proyecto que se presenta en los siguientes capítulos. Cada método ocupa diferentes características lo cual los hace singulares, y por ello la elección del método que se use, dependerá del criterio experiencia o simple gusto del ingeniero o encargado del proyecto. A continuación, se muestran las características de los más usados en

la actualidad en México; el método Marshall, el método Hveem, el método por Superpave, y el método por Protocolo AMAAC.

#### 1.4.1) Método Marshall

Fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, y mejorado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos. Este método tiene como propósito principal es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método original solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados de 1" (25 mm) o menores, mientras que el método modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 1.5" (38 mm). Para la granulometría de los agregados pétreos el método ocupa una gráfica semilogarítmica para definir cuál material está permitido. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Este método está pensado para diseño en laboratorio y control de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Este método utiliza especímenes de prueba de mezcla compactada con una altura de 64mm (2 ½") y 102mm de diámetro (4") las cuales se preparan calentando, mezclando y compactando mezclas de asfalto con agregado pétreo. Para comprobar la estabilidad los especímenes, se someten a una prueba de compresión en la cual la resistencia máxima obtenida en N (lb) será la estabilidad del espécimen a una temperatura de 60°C en la cual es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

#### 1.4.2) Método Hveem

Desarrollado por el ingeniero de materiales e investigación con la división de carreteras de california Francis N. Hveem en 1940, este método abarca la determinación de un contenido de asfalto aproximado por el método del ensayo equivalente centrífugo de queroseno y luego el sometimiento de probetas con el

contenido de asfalto estimado antes, y con contenidos mayores y menores, a un ensayo de estabilidad, y también se efectúa un ensayo de expansión sobre una probeta que antes se puso en contacto con agua.

El método tiene como principal objetivo determinar el contenido de asfalto para una combinación específica de agregados. El cemento asfáltico que se ocupa es clasificado por viscosidad y penetración, mientras que los agregados tienen un tamaño máximo de 25 mm (1"). Este método se base en una serie de pruebas para determinar el contenido óptimo de asfalto, empezando por el ensayo de equivalente centrífugo de queroseno, siguiente de esto se preparan especímenes con el contenido aproximado obtenido antes y con contenidos mayores y menores a este, teniendo los especímenes necesarios y en condiciones idóneas, se continua el método con el ensayo de estabilidad para evaluar la resistencia a la deformación y el ensayo de expansión para determinar el efecto del agua que produce en el volumen de la mezcla y su permeabilidad. (Cáceres Morales, 2007)

#### 1.4.3) Método Superpave

En el año de 1987 el congreso de los Estados Unidos estableció el SHRP (*Strategic Highway Research Program*, "Programa Estratégico de Investigación de Carreteras") a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras, volviéndolas más seguras tanto para automovilistas y trabajadores de las mismas. El programa inicio con el desarrollo de un sistema para especificar materiales asfálticos el cual es llamado SUPERPAVE (SUPERIOR PERFORMING ASPHALT PAVEMENT). Este sistema tiene la capacidad tecnológica de especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas, así como analizar y establecer predicciones de cómo se comportará el pavimento. Este método evalúa por separado los componentes de la mezcla, y también su interacción cuando ya están mezclados.

Este método especifica la granulometría del agregado pétreo modificando el enfoque de la granulometría Marshall. Para especificar la granulometría se emplean dos conceptos adicionales; puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos

(0.075 mm). Mientras que la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. En cuestión de la selección del contenido óptimo de asfalto depende de dos factores estos son los criterios aplicados a la compactación y a la cantidad de giros aplicados (Se usa un compactador Giratorio). Para la compactación se pueden mencionar como parámetros; el esfuerzo vertical, el ángulo de giro y la velocidad de giro. Mientras que para el caso de la cantidad de giros está en función de la temperatura promedio del lugar y del número de ejes equivalentes (ESAL's) establecidos en el diseño. (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

#### 1.4.4) Método del Protocolo AMAAC

Este método utiliza una metodología para diseñar una mezcla asfáltica destinada a pavimentos en los cuales se desee obtener altos niveles de desempeño. Esta mezcla asfáltica de alto desempeño es una mezcla elaborada en caliente, resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de la fatiga, y al daño de la humedad, y su comportamiento es superior a una mezcla asfáltica convencional. Por lo tanto, este método es el que se usara en el desarrollo experimental del tema, por esta razón se presenta de manera más extensa los detalles que se toman en cuenta en este método de diseño.

Para fines de diseño la mezcla asfáltica se considera como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida que son los agregados pétreos, una fase líquida que es el cemento asfáltico y una fase gaseosa que es el aire.

Para la selección de los agregados pétreos se hace de acuerdo con la función requerida para el pavimento asfáltico. Este método propone 5 tipos de mezcla asfáltica cuya designación se muestra en la Ilustración 5. Cada una de estas designaciones deben cumplir requisitos en la granulometría o como lo maneja el protocolo, puntos de control que son los que se presentan en la Ilustración 6. Este método divide en dos grupos las granulometrías; Granulometría Fina y Granulometría Gruesa. En la ilustración 7 se muestra cómo se definen ambos grupos. Estos grupos tienen características específicas las cuales repercuten directamente en el comportamiento de la carpeta asfáltica; (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)



*Ilustración 4: Imagen representativa del sistema trifásico de una mezcla asfáltica.*

- La granulometría fina
  - Tiene una menor permeabilidad
  - Tiene buena trabajabilidad cuando tiene un tamaño nominal menor a 25 mm
  - Se pueden ocupar para espesores delgados cuando se ocupa el tamaño nominal menor a 25 mm
  - En carreteras de transito bajo tienen mayor durabilidad.
  - Cuando se ocupa un tamaño nominal menor a 25 mm tiene una textura lisa
  
- La granulometría Gruesa
  - Con un tamaño nominal mayor a 25 mm esta granulometría permite elevar los espesores de la carpeta
  - Incrementa la macro textura con un tamaño nominal mayor a 25 mm
  - Al tener partículas de mayor tamaño mejora la estructura interna volviéndola friccionante

- Tiene una mayor durabilidad en todos los tipos de proyecto.

Granulometría por tipo de mezcla		
Designación de la mezcla	Tamaño nominal	Tamaño máximo
mm	mm	mm
37,5	37,5	50,0
25,0	25,0	37,5
19,0	19,0	25,0
12,5	12,5	19,0
9,5	9,5	12,5

*Ilustración 5: Designación del tipo de mezcla asfáltica en función del tamaño nominal. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)*

En la Ilustración 8 se muestra la recomendación que hace el protocolo para los espesores según el tipo de granulometría.

Estas mezclas de granulometría densa pueden cumplir cualquier o todas las necesidades siguientes según se le presenten al diseñador del pavimento:

- Estructural: Este es el principal propósito de una mezcla de granulometría densa, y sobre todo es una función del espesor de la capa. Pero también cabe resaltar que los materiales que se elijan pueden mejorar el valor estructural de la capa. En estas se ocupan mezclas finas y gruesas de 37.5, 25 y 19 mm.
- Fricción: Esta es una necesidad importante en las carpetas de la superficie y es una función de los agregados y la mezcla, estas mezclas ocupan una granulometría gruesa de 19, 12.5 y 9.5 mm.
- Nivelación: Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones en la carretera. Usa una mezcla fina de 12.5 o 9.5mm.

- Bacheo: Esta mezcla debe reunir las mismas características que la utilizada en una nueva. Usa una mezcla fina o gruesa de 12.5 y 9.5mm.

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37,5 (1-1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")
		Porcentaje que pasa				
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25	-90	90 - 100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	-90	90 - 100	100 - 100	-
1/2"	12,5	-	-	-90	90 - 100	100 - 100
3/8"	9,5	-	-	-	-90	90 - 100
4	4,75	-	-	-	-	-90
8	2,36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
16	1,18	-	-	-	-	-
30	0,60	-	-	-	-	-
50	0,30	-	-	-	-	-
100	0,15	-	-	-	-	-
200	0,075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Ilustración 6; Requisitos de granulometrías, o Puntos de control. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)

Tamaño de mezcla	Granulometría fina	Granulometría gruesa
37,5 mm (1 1/2")	< 47% Pasando malla de 9,5	> 47% Pasando malla de 9,5
25,0 mm (1")	< 40% Pasando malla de 4,75	> 40% Pasando malla de 4,75
19,0 mm (3/4")	< 47% Pasando malla de 4,75	> 47% Pasando malla de 4,75
12,5 mm (1/2")	< 39% Pasando malla de 2,36	> 39% Pasando malla de 2,36
9,5 mm (3/8")	< 47% Pasando malla de 2,36	> 47% Pasando malla de 2,36
4,75 mm (Malla número 4)	N/A (granulometría no estándar)	

Ilustración 7; Definición de granulometrías por designación de la mezcla. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)

Los agregados pétreos de la mezcla deben cumplir con características físicas las cuales se revisan por medio de diferentes pruebas que se enlistan en la Ilustración 9 e Ilustración 10. Para que los agregados cumplan las características, se recomienda que el material sea producto de trituración. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013).

En cuanto al asfalto se debe seleccionar en función a la temperatura mínima y máxima que se espera en el lugar donde se aplicara. En el caso de los asfaltos sin modificar, se les determinara su carta de viscosidad por medio de un viscosímetro

rotacional, de acuerdo con la norma ASTM – D-4402. Con esta carta se conocerán las temperaturas adecuadas para el mezclado y compactación.

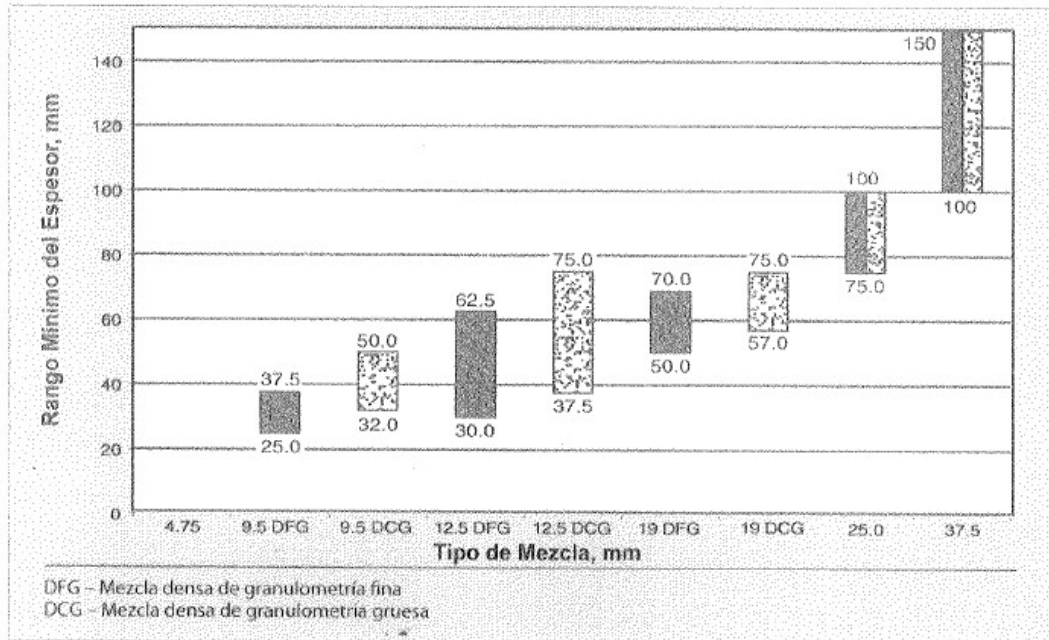


Ilustración 8; Recomendación para espesores según la granulometría que marca el diseño. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)

Mientras que, para los asfaltos modificados, el proveedor debe proporcionar las temperaturas necesarias. Para saber cuál es la temperatura de mezclado y compactación se debe acudir a los rangos que ocupa el método que, que se muestran en la Ilustración 11. Después de seleccionar el asfalto y conocer sus temperaturas, se debe establecer el nivel de diseño que tendrá la mezcla asfáltica de granulometría densa pues este método tiene 4 niveles de diseño los están determinados por el nivel de tránsito o el desempeño deseado según la

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T 327 / ASTM D6928	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104 / ASTM C 88	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D 4791	5 a 1, 10% máx. <sup>(1)</sup>
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08	90 mín.

Ilustración 9: Características que debe cumplir la fracción gruesa del agregado pétreo.

infraestructura requerida. A continuación, se muestra los niveles de diseño. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013).

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, ml/g	Recomendación AMAAC RA-05	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

*Ilustración 10: Características que debe cumplir la fracción fina del agregado pétreo*

Característica	Rango de viscosidad, Pa.s
Temperatura de mezclado	0,15 a 0,19
Temperatura de compactación	0,25 a 0,31

*Ilustración 11: Rangos de viscosidad para la selección de temperaturas de mezclado y compactación.*

Cada nivel tiene características que se deben tomar en cuenta para la elección de este. El protocolo marca las características de cada nivel (Ilustración 12).

Para el diseño volumétrico de la mezcla el protocolo da una serie de pasos para obtener el contenido de asfalto óptimo:

1. Calcular la gravedad específica del agregado ( $G_{sb}$ ), según la propuesta granulométrica. Y determinar el contenido de asfalto inicial
2. Obtener las temperaturas de compactación y mezclado
3. Determinar la gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) para el contenido de asfalto inicial.
4. Calcular la gravedad efectiva del agregado ( $G_{se}$ ).
5. Determinar las propiedades volumétricas bajo diferentes contenidos de asfalto (contenido de asfalto inicial,  $\pm 0.5$  y  $+1\%$ ).
6. Determinar el contenido óptimo de asfaltos de acuerdo a lo establecido anteriormente.

7. Verificar las propiedades volumétricas de la mezcla con el contenido óptimo de asfalto, realizando los ensayos de  $G_{mb}$  y  $G_{mm}$ .
8. Una vez verificadas las propiedades volumétricas se realizan los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente.



Ilustración 12: Niveles de diseño para mezclas asfálticas por protocolo AMAAC.

Los pasos son para diseñar una mezcla a nivel I, cada nivel mayor de diseño tiene una prueba más para comprobar las características de la mezcla (Ilustración 13).

- Para nivel II: Susceptibilidad a la deformación permanente.
- Para nivel III: Modulo dinámico.
- Para nivel IV: Diseño por fatiga. (Asociación Mexicana del Asfalto, 2013)

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	menor a 1 000 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales tipo D</li> <li>• Carreteras alimentadoras</li> <li>• Carreteras estatales y municipales</li> <li>• Calles urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> </ul>
Nivel II Tránsito medio	de 1 000 000 a 3 000 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras estatales</li> <li>• Carreteras federales tipo B y C</li> <li>• Vialidades urbanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> </ul>
Nivel III Tránsito alto	de 3 000 000 a 30 000 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales tipo A</li> <li>• Autopistas de cuota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> </ul>
Nivel IV Tránsito muy alto	más de 30 000 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras federales troncales</li> <li>• Autopistas de cuota importantes</li> <li>• Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad</li> <li>• Susceptibilidad a la deformación permanente</li> <li>• Módulo dinámico</li> <li>• Fatiga</li> </ul>

Ilustración 13: Niveles de diseño en función de los ejes equivalentes de 8.2 ton y el tipo de carretera.

## Capítulo 2: Fallas y revisión de esfuerzos

### 2.1) Cargas y esfuerzos principales.

El pavimento flexible está puesto a una sollicitación directa al sistema estructural que forma el pavimento, esta sollicitación está constituida por el tránsito vehicular. Es por el paso repetido de los vehículos que los pavimentos se deterioran. Su caracterización es fundamental, y a la vez muy compleja dada la gran distribución de tipos de vehículos y de las cargas que se pueden encontrar en la actualidad. Para la caracterización del tránsito vehicular se puede utilizar la práctica común en México de transformarlo en un cierto número de ejes equivalentes sencillos duales de 8 ton. para el periodo de diseño, siempre y cuando se tenga claro que factores de equivalencia se van a usar. Lo que se propone es trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su correspondiente distribución de cargas por eje, a través del concepto de espectro de carga. (Garnica Anguas & Correa, Conceptos Mecanicistas en pavimentos., 2004).

El estado del conocimiento en la distribución de los esfuerzos y deformaciones partió de la teoría original de Boussinesq y la primera solución se creó para el caso de pavimentos de una sola capa. Aunque en realidad, los pavimentos flexibles se definen como la unión de capas de diferentes materiales dispuestos de tal manera que la calidad de estos disminuye en relación proporcional a la profundidad a la que son colocados. Debido a esto, un pavimento flexible no puede ser considerado como una placa homogénea ya que las características de cada capa son diferentes. Tomando en cuenta esto Burmister propuso en 1943, la teoría para analizar el estado de esfuerzos en una estructura de pavimentos, primero propuso la solución basada en dos capas y después fue extendida a tres capas. Existen ciertas consideraciones a tomar en cuenta para aplicar esta teoría son las siguientes:

- Cada una de las capas es homogénea, isotrópica y linealmente elástica.
- El material no tiene peso.
- Cada capa tiene un espesor finito, a excepción de la capa más baja que es infinita.
- Existe una carga uniforme “q” que es aplicada en la superficie sobre un área circular de diámetro “a”.

- La fricción se desarrolla completamente entre cada una de las capas.
- El plano de corte no está presente en la superficie.
- La solución del esfuerzo se basa en dos propiedades de los materiales para cada capa: la relación de Poisson  $\nu$ , y el Módulo de elasticidad  $E$ .

Las condiciones de continuidad se cumplen en las interfaces de cada capa, como se indica en el mismo esfuerzo vertical, esfuerzo cortante, desplazamiento vertical y radial.

La teoría de Burmister establece que el estado de esfuerzos en un punto de cualquier capa está caracterizado por 9 tipos de esfuerzos compuestos de la siguiente manera; tres esfuerzos normales ( $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ) a las caras del elemento, y seis esfuerzos cortantes ( $T_{rt}$ ,  $T_{tr}$ ,  $T_{rz}$ ,  $T_{zr}$ ,  $T_{tz}$ ,  $T_{zt}$ ) que actúan de forma paralela a la cara del mismo elemento.

Otra de las condiciones que existen en un pavimento y que son simplificadas en las teorías de cálculo del estado de esfuerzos, se refiere a la diversidad de los materiales utilizados en el pavimento. En general, en la naturaleza existen diferentes materiales que presentan diferente respuesta a la aplicación de una carga; para caracterizarlos se utilizan tres relaciones: la relación entre el esfuerzo y la deformación (lineal o no lineal), la dependencia de la deformación en función del tiempo de aplicación, bajo un nivel de esfuerzo constante (viscoso o no viscoso), y el grado en el que el material puede recuperarse de la deformación (plástico o elástico) después de que se retira la carga.

Los espectros de carga, como el que se muestra en la Ilustración 14, son una herramienta de análisis para utilizar un esquema agregado de la clasificación vehicular, los cuales identifican cuantos ejes (sencillos, duales, trídem) se presentan para cada tipo de vehículo, y sus cargas normalizadas se divide en intervalos de frecuencia que por lo regular se utiliza 1 kip para los ejes sencillos, 2 kips para los ejes tándem y 3 kips para los ejes trídem. Este análisis puede ser para cada tipo de vehículo en lo particular o bien para un mismo eje que incluya a todos los vehículos del análisis. (Hernández, Garnica, & Solorio, 2011).

Cada punto en el espectro de carga representa el porcentaje de ese tipo de eje que circula con cierto nivel de carga; los picos representan mayores porcentajes de participación. En la Ilustración 14 se muestra que el eje sencillo presenta un solo pico, esto quiere decir que los ejes sencillos de un T3-S2 circulan con un valor promedio de carga del orden de los 5 ton. lo que representa un 3% de participación con respecto a la totalidad de ejes en la estación de aforo. Mientras que para los ejes tándem, se pueden observar dos picos, que equivalen a dos situaciones diferentes, por ejemplo, a cuando van vacíos y/o cargados.

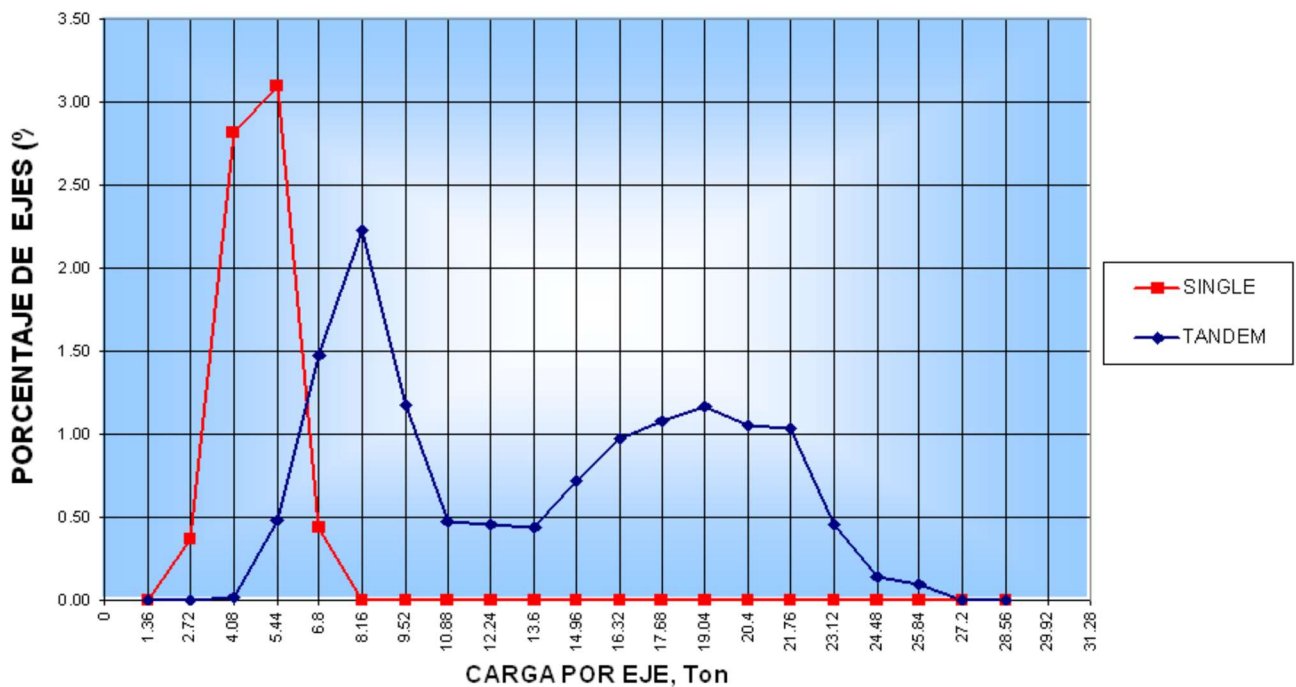


Ilustración 14: Espectro de carga ( (Hernández, Garnica , & Solorio, 2011))

Estas cargas causadas por el tránsito vehicular, se transmiten a la estructura del pavimento como esfuerzos

Cada capa reacciona de manera diferente a deformaciones y tensiones en la superficie de contacto, por lo que el diseño de cada capa debe relacionarse entre sí con las demás con el objetivo de conseguir un comportamiento estructural deseable. En el diseño de pavimentos, las cargas más pesadas son las que interesan debido a que son las que más deterioran el pavimento, por ello son las utilizadas para

determinar el espesor total. La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos también son fundamentales para el cálculo, teniendo en cuenta las máximas presiones de contacto.

De manera general para el transporte por carretera los ejes neumáticos se pueden clasificar como:

- Neumático simple o neumático doble.
- Ejes sencillos, ejes tándem, ejes trídem.

En las carreteras mexicanas los pesos máximos permitidos por eje sencillo, o carga legal, varían entre 6.5 a 11 toneladas. Si no se considera el efecto del neumático sobre el pavimento, entonces la presión de contacto entre el neumático y el pavimento será igual a la presión de aire en el neumático. Para presiones bajas, se considera que la mayor presión en el neumático se presenta al centro de este. Es común asumir que la presión de contacto es uniforme en toda el área de huella del neumático. (Hernández , Garnica , & Solorio, 2011)

## 2.2) Estados de falla.

Los estados de falla son los defectos que presenta un pavimento y que disminuyen la comodidad del usuario o la vida de servicio de esa estructura, frecuentemente corresponden a defectos constructivos y difícilmente pueden clasificarse como deterioros. (Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica., 2002). El conocimiento de las condiciones en que se encuentra un pavimento y de su comportamiento a través de su diseño, construcción y operación. Originalmente, la capacidad de un pavimento para soportar un tránsito se determinaba por ensayo y error basándose en la experiencia del especialista y las manifestaciones de deterioro superficiales de casos similares. En la década de 1950, los sistemas de medición comenzaron a aparecer de manera que pudiera valorarse objetivamente la condición del pavimento. Este proceso es conocido generalmente como evaluación del pavimento y ha sido objeto de importantes avances tecnológicos, convirtiéndose en un proceso sistematizado. Asimismo, y en el afán de cumplir con los objetivos de una evaluación se debe completar la evaluación de campo con el trabajo en gabinete, recabando información de tipo documental, estudiando

metodologías contemporáneas y revisando la experiencia que se tiene en la materia dentro de un contexto global. (Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres, A.C., 2011). A continuación, se presentan algunos de los estados de falla que se han clasificado a lo largo de las investigaciones ya realizadas.

#### 2.2.1) Fisuras y grietas por fatigamiento.

También conocido como “piel de cocodrilo” son una serie de grietas interconectadas cuyo origen es por falla por fatiga del concreto asfáltico bajo la repetición de cargas vehiculares, este agrietamiento inicia en el fondo de la carpeta asfáltica, donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión alcanzan sus máximas. Estas grietas se extienden a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas que después se interconectan formando polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón similar a malla de gallinero o a piel de cocodrilo. Este tipo de grietas ocurren únicamente en áreas sujetas a cargas repetidas de tránsito tales como las huellas de los neumáticos.

Este agrietamiento se considera como un signo de deterioro estructural importante y generalmente coincide con la formación de las roderas. Tienen 3 niveles de severidad.

- L (Ligera): Grietas finas capilares y longitudinales que se desarrollan de forma paralela con unas pocas o ninguna interconectadas y no presentan despostillamiento.
- M (Moderada): Desarrollo posterior de grietas piel de cocodrilo del nivel ligero, en un patrón o red de grietas con despostillamiento.
- S (Severa): Red o patrón de grietas que ha evolucionado de tal forma que las piezas o pedazos están bien definidos y despostillados. Algunos pedazos pueden moverse o inclusive desprenderse bajo la acción del tránsito vehicular.

Para conocer la medida de este tipo de falla, se estima el área afectada y se expresa como un porcentaje del área total del tramo.



*Ilustración 15; Falla por fatigamiento severa. Carretera Federal México Puebla Km 94.*

### 2.2.2) Fisuras y grietas en bloque

Son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares, los cuales pueden variar de tamaño de 0.30m x 0.30m a 3.00m x 3.00m. Estas grietas se producen originalmente por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios, e indican que el asfalto ha endurecido significativamente, y no están asociadas a las cargas del tránsito.

#### Niveles de severidad

- L: Bloques con grietas de una medida menor a 6 mm, grietas selladas con material sellador en buenas condiciones con una anchura ligera que no se puede determinar.
- M: Bloques con grietas de una anchura de 6mm a 19 mm, o cualquier grieta con un ancho menor a 19 mm y con grietas adyacentes ligeramente severas.
- S: Bloques con grietas con un ancho mayor a 19 mm, o cualquier grieta menor a 19 mm con moderada o severa presencia de agrietamiento adyacente.

Estas grietas se miden en metro cuadrados y se expresa como un porcentaje del área total del tramo.



*Ilustración 16: Fisuras o grietas en borde. Colonia Loma Bella, Puebla*

### 2.2.3) Grietas en borde

Este defecto consiste en la formación de grietas paralelas al eje longitudinal y, generalmente, están a una distancia entre 0.30m y 0.60m del borde exterior del pavimento. Este agrietamiento se acelera por las cargas del tránsito y pueden originarse por debilitamiento a causa de las condiciones climáticas. El área de la grieta y el borde del pavimento se clasifica de acuerdo con la forma en cómo se agrieta.

Niveles de severidad

- L: Agrietamiento bajo sin fragmentación o desprendimiento
- M: Grietas medias con algo de fragmentación y desprendimiento.
- S: Considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde.

Al igual que las grietas en bloque esta se mide en metros cuadrados y se expresa como porcentaje del tramo total.



*Ilustración 17; Grietas en borde, Carretera Federal México Puebla*

#### 2.2.4) Fisuras y grietas longitudinales y transversales

Las grietas longitudinales son grietas paralelas al eje del pavimento o a la dirección de la construcción y estas pueden ser causadas por el mal tratamiento de las juntas de construcción de la carpeta asfáltica, o por contracción o reflexión. Mientras que las grietas transversales se extienden a través del pavimento formando ángulos aproximadamente rectos al eje del pavimento. Estas grietas no aparecen como causa del peso del tránsito sobre la carpeta.

##### Niveles de severidad

- L: Grietas sin calafatear con aberturas menores de 10.00mm o grietas que estén bien calafateadas de cualquier abertura.
- M: Grietas sin calafatear de 10.00mm a 76.00mm de abertura o bien grieta de hasta 76.00mm de abertura, rodeadas por fisuras ligeras. También entran en este nivel las grietas calafateadas de cualquier abertura rodeadas por fisuras ligeras.
- S: Cualquier grieta calafateada o no, rodeada por grietas de severidad media o alta. También grietas sin calafatear con una abertura superior a los 76.00mm. O cualquier grieta de cualquier abertura donde el pavimento contiguo a la grieta muestre roturas severas.

En cuestión de la medida de estas grietas estas se expresan por porcentaje del área del total del tramo.



*Ilustración 18: Fisuras o Grietas longitudinales, Carretera Fed. México Puebla km 96.5*

#### 2.2.5) Baches abiertos

Son depresiones pequeñas en la superficie del pavimento usualmente con diámetros menores a 0.90m y con forma de tazón por lo general presentan orillas bien recortadas y paredes verticales cerca de la superficie. Se producen cuando el paso vehicular arranca pequeños pedazos de la superficie del pavimento. La desintegración del pavimento progresa debido a mezclas pobres en la superficie, puntos débiles de la base o la subrasante o por haber alcanzado una condición de piel de cocodrilo severa. El crecimiento de los baches se acelera por la acumulación de agua dentro de ellos.

Niveles de severidad.

- L: depresiones con 25 mm de profundidad
- M: Depresiones de 25 mm a 50 mm de profundidad

- S: Depresiones con profundidades mayores a 50 mm de profundidad



*Ilustración 19: Bache abierto Severo, Carretera Federal Mexico Puebla km 96.5*

#### 2.2.6) Baches o cortes reparados

Es un área de pavimento la cual ha sido remplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente, esta área es más grande que 0.1 m<sup>2</sup>. Este bache considera un defecto sin importar que tan bien se comporte, pues no tendrá las mismas características que el pavimento original y por lo general se encuentran irregularidades asociadas a este daño.

#### Niveles de Severidad

- L: La reparación está en buena condición y la capa de asfalto sobresaliente, es menor a 6 mm y la diferencia de nivel no es evidente
- M: La reparación se encuentra moderadamente deteriorada y la conducción es de regular comodidad. La capa de asfalto sobresaliente va de 6 mm a 12 mm el desnivel es ligeramente evidente
- S: La reparación se encuentra muy deteriorada, y la conducción se vuelve muy incómoda y requiere reparación. En este nivel también entran las reparaciones cuya capa sobresaliente es mayor a los 12 mm siendo

evidente el desnivel. Y también entran aquí las reparaciones hechas con diferentes materiales.



*Ilustración 20: Bache reparado moderado, Carretera Federal México Puebla km 95*

### 2.2.7) Roderas

Son depresiones a lo largo de las zonas donde se concentra el paso de los neumáticos de los vehículos. En estas fallas se pueden presentar levantamientos en los costados de la rodera. La formación de la rodera se deriva de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante, en general las roderas son indicadores de deficiencias estructurales del pavimento. Antes de esta falla se presentan el agrietamiento de piel de cocodrilo como signo de fatigamiento del pavimento.

#### Niveles de Severidad

Esta falla clasifica la severidad por la profundidad de la rodera

- L: De 6.00 mm a 13.00 mm
- M: De 13.00 mm a 25.00 mm

- S: Mayor a 25.00 mm



*Ilustración 21: Rodería por fatiga, Ciudad Universitaria BUAP*

#### 2.2.8) Meteorización, desprendimiento o desgaste.

Esta es la pérdida de adherencia entre el asfalto y el agregado. Este daño indica que el asfalto se ha endurecido o por baja calidad de la mezcla. Además, el desprendimiento puede ser causado por ciertos tipos de tránsito. También se considera desprendimiento al ablandamiento de la superficie a causa del derramamiento de sustancias en la carpeta.

#### Niveles de severidad

- L: El agregado pétreo o el asfalto se comienza a desgastar, y se comienzan a observar pequeñas cavidades en la superficie del pavimento.
- M: El agregado pétreo y el asfalto se han desgastado, y se nota una textura áspera con cavidades pequeñas en la superficie.
- S: El agregado pétreo y el asfalto se han desgastado muy considerablemente, La textura se ha vuelto áspera en la superficie llena de cavidades pequeñas, si se encuentran cavidades mayores a 10.00 mm

de diámetro y con una profundidad de hasta 13.00 mm se deben considerar como un bache abierto.



*Ilustración 22: Meteorización, Colonia Loma Bella, Puebla, Puebla.*

### 2.3) Evaluación de esfuerzos principales por el método de Protocolo AMAAC.

El protocolo AAMAC tiene pruebas para evaluar los esfuerzos principales, estas pruebas marcan los límites de cada nivel de diseño de una mezcla asfáltica. Cada una de ellas evalúa un aspecto de la mezcla (el efecto de la humedad en la mezcla, resistencia a compresión o resistencia a tensión). Con cada aspecto que se evalúa, la mezcla asfáltica mejora en sus propiedades físicas y aumenta su nivel en el protocolo AAMAC. A continuación, se describen las pruebas que caracterizan cada nivel del protocolo.

#### 2.3.1) Susceptibilidad a la Humedad (TSR)

Este método consiste en determinar en una mezcla asfáltica compacta el daño incluido por efectos de la humedad comparando la resistencia a la tensión indirecta en una serie de especímenes acondicionados y no acondicionados. Para todos los niveles de diseño, la mezcla debe tener como mínimo un 80% de resistencia conservada.

Para esta prueba se necesitan especímenes cilíndricos con un diámetro de 100 mm y una altura de 63.5 +/- 2.5 mm o de 150 mm de diámetro y 95 +/- 5 mm de altura se deben preparar por lo menos 6 especímenes la mitad serán ensayados en seco y la otra mitad se ensayarán después de un acondicionamiento que consiste en la saturación parcial del espécimen acompañado de un ciclo de congelamiento y

deshielo. Los especímenes pueden ser preparados con mezcla hecha en laboratorio, mezcla hecha en planta y compactada en laboratorio o con testigos de obra (mezcla hecha y compactada en obra). La compactación de los primeros dos casos, se puede llevar a cabo con compactador giratorio o con un martillo Marshall, ajustando el número de giros o el número de golpes para obtener el volumen de vacíos deseado que es de  $7.0 \pm 0.5\%$ . Para los especímenes extraídos desde obra (testigos de obra) se seleccionan los sitios más representativos del estado general del pavimento. Cuando se va a evaluar una carpeta con un espesor menor o igual a 63.5 mm se extraen especímenes de 100 mm de diámetro, y si por lo contrario la carpeta tiene un espesor mayor a 63.5 mm se deberán obtener especímenes de 150 mm de diámetro. Para la evaluación de estos especímenes la prueba no toma en cuenta la cantidad de vacíos de la mezcla. Para todos los casos, aparte de los especímenes elaborados es necesario elaborar al menos dos mezclas más las cuales deben ser curadas con la misma temperatura y tiempo que las que fueron compactadas, esto para obtener la gravedad teórica máxima  $G_{mm}$ .

El ensaye de estos especímenes consiste en la determinación del esfuerzo máximo que es capaz de soportar los especímenes de mezcla compactada, bajo el ensaye de tensión indirecta a una temperatura de  $25^{\circ} \text{C}$ , para los especímenes acondicionados y no acondicionados. La prueba se lleva a cabo en una prensa hidráulica, mecánica o neumática con capacidad de carga provista con un actuador que permita controlar la deformación vertical incluyendo una velocidad de 50 mm por minuto y que permita la adquisición de datos suficiente para la ejecución de los ensayos. También se necesita una Mordaza Lottman hecha de acero con una superficie cóncava de radio de curvatura igual a l radio del espécimen a ensayar (100 mm o 150 mm), las barras que usa la mordaza deben ser mayor a la altura de los especímenes, y estarán montadas sobre una base que permita un movimiento libre de estas. Las esquinas de las barras deberán tener un ancho de 12.7 mm y de 19.05 mm respectivamente, y sus esquinas deberán estar redondeadas para la correcta colocación de los especímenes.

Esta prueba debe cumplir con la norma de la SCT N.CMT.4.5.003, Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. (Asociación Mexicana del Asfalto A.C., 2010)



*Ilustración 23; Espécimen de prueba TSR antes de la prueba.*



*Ilustración 24; Prensa de carga utilizada en la prueba.*

### 2.3.2) Susceptibilidad a la deformación Permanente

Para revisar esta característica, se pueden usar tres diferentes ensayos; La rueda cargada de Hamburgo, el método del Analizador de Pavimentos Asfálticos APA o el ensaye de la pistola española. El ensaye más común es la rueda cargada de Hamburgo.

#### a) La rueda Cargada de Hamburgo:

Este ensayo tiene como objetivo determinar la susceptibilidad a la falla prematura de la mezcla asfáltica debido a la debilidad en la estructura del agregado pétreo, inadecuada rigidez del asfalto o daño por la humedad. Este método de ensayo mide

la profundidad de la deformación y el número de repeticiones de carga para alcanzar la falla del espécimen analizado, esto simula el paso repetido de los vehículos cargados para predecir la deformación permanente espesada.

Los efectos del potencial daño por humedad se evalúan desde que los especímenes son sumergidos en el agua con temperatura controlada durante la aplicación de la carga.

Para estos ensayos se usan especímenes circulares o prismáticos, con el contenido de asfalto establecido, y respetando las temperaturas de mezclado y compactación que marca la carta de viscosidad del asfalto. Para compactar la mezcla puede usarse el compactador giratorio, utilizando un molde metálico de 150 mm de diámetro, o un compactador lineal para especímenes prismáticos los cuales tendrán un espesor con un mínimo al doble del tamaño nominal del agregado (entre 38 mm y 100 mm). Para estos especímenes deben tener un 7 +/- 1% de vacíos en la mezcla compacta. En cuestión de especímenes extraídos en campo, deben tener un diámetro de 150 mm o 254 mm +/- 2 mm. Para cuando se ocupan especímenes de 150 mm se deberán tener extraer 6 especímenes y para los especímenes de 254 mm solo son necesarios 3 especímenes. También pueden obtenerse prismas de 260 mm de ancho por 320 mm de largo. Estos especímenes tendrán un espesor de 38 mm hasta 100 mm esto dependerá del espesor de la misma carpeta a analizar. En los especímenes extraídos, se deberán analizar con la cantidad de vacíos que tienen en campo.

En cuanto a la rueda cargada de Hamburgo, es un equipo que consiste en ruedas de acero de 47 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro cada una, las cuales estarán colocadas sobre los especímenes de mezcla asfáltica aplicando una carga de 705 +/- 4.5 N por cada rueda. Estas deben hacer 50 +/- 5 pasadas por minuto a una velocidad máxima de 30.5 cm por segundo aproximadamente. Como ya se ha comentado los especímenes también están expuestos a humedad pues se encuentran sumergidos en agua mientras se realiza la prueba, el agua debe tener una temperatura 50 +/- 1°C y el equipo debe tener la capacidad de controlar esa temperatura en el agua durante todo lo que dure la prueba. En cuanto a la duración

de la prueba está esta finaliza cuando las ruedas dan 20,000 ciclos o cuando el espécimen llega a una deformación máxima de 10 mm.

Los resultados de la prueba se muestran en una gráfica de comportamiento de la mezcla durante la prueba, en la que se coloca en el eje X el número de ciclos y en el eje Y la deformación correspondiente en mm. (Asociación Mexicana del Asfalto A.C., Recomendacion AMAAC RA 01/2011, 2011).



*Ilustración 25; Equipo de Rueda cargada de Hamburgo en uso.*



*Ilustración 26; Espécimen de mezcla asfáltica luego de terminada la prueba.*

### 2.3.3) Modulo Dinámico

Este es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Está definido como la medida de resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente que se encuentra bajo una carga sinusoidal. Este es el valor absoluto del módulo complejo, el cual consiste en dos partes, la parte real, que representa la resistencia

elástica, y la parte imaginaria que representa el debilitamiento interno de los materiales de la mezcla. El módulo dinámico es determinado por la máxima tensión aplicada y la deformación máxima recuperable, como lo indica la siguiente ecuación:

$$E^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\phi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\phi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

En donde:

$E^*$  = Modulo Dinámico (psi)

$\sigma_0$  = Amplitud de tensión (psi)

$\varepsilon_0$  = Amplitud de deformación ( $\mu\varepsilon$ )

$\phi$  = Angulo de fase (radianes)

Este último describe el retraso provocado por la deformación axial inducida en relación a la fuerza de tensión aplicada esto se muestra en la ilustración 27:

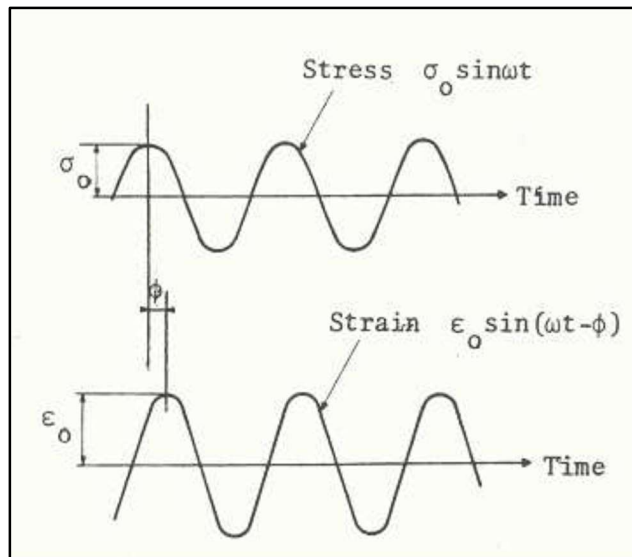


Ilustración 27: Fase de retraso entre la fuerza de tensión sinodal y la deformación inducida.

En donde el pulso sinodal de tensión está definido por una velocidad angular  $\omega$  y tiempo  $t$ . de esta manera esta fase de retraso, representa la dependencia con el tiempo de las mezclas asfálticas en caliente.

Módulo dinámico definido en el laboratorio.

Anteriormente la prueba de laboratorio para encontrar el valor del módulo dinámico, consistía en una prueba de flexión de dos puntos usando especímenes trapezoidales que estaban cargados bajo una tensión compresiva sinusoidal. Este método desarrollado por los Laboratorios SHELL podía determinar el módulo de rigidez de dos maneras: la primera manera para determinarlo es a partir de un cálculo usando la medida de la fuerza aplicada y la medida del desplazamiento en el extremo libre del espécimen. El segundo método utiliza la medida de la deformación y la tensión aplicada para calcular el módulo dinámico. Para probar las mezclas asfálticas se utilizaban tres frecuencias (4,40 y 50 Hz) y tres temperaturas (-15, 9, y 30° C) para encontrar el tiempo y la temperatura de carga donde se presentan los parámetros significativos de las deformaciones por flexión de la mezcla asfáltica en caliente, ya que en condiciones de servicio estándar pueden variar desde 1,400 a 6, 000,000 psi

El método más reciente y ampliamente usado es el método estándar AASHTO TP62-07. Se ocupan especímenes cilíndricos a los cuales se les aplica un esfuerzo de compresión axial a una temperatura y frecuencia determinada. Las temperaturas son -10°, 5°, 25°, 40°, y 55° C. Mientras que las frecuencias son 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz. En los especímenes se colocan como mínimo 2 *transformadores diferenciales de variación lineal* en diferentes lugares del espécimen para medir la deformación axial, para cada deformación recuperada se calcula.

En este proceso el módulo dinámico está definido como la razón entre la magnitud del esfuerzo y el promedio de la magnitud de la deformación causada. Además, los ángulos de fase del cálculo se resumen en el procedimiento.

El procedimiento de módulo dinámico depende fundamentalmente de dos parámetros; La temperatura y la frecuencia. El valor de módulo dinámico disminuye cuando la temperatura aumenta y la frecuencia de la carga disminuye. Mirando los especímenes de forma interna, hay otros parámetros que influyen en la variabilidad de la magnitud del módulo dinámico. Como ya se explicó antes, las mezclas asfálticas en caliente están definidas por dos componentes; los agregados pétreos

y el ligante asfáltico. Cada componente tiene numerosas propiedades que influyen en la respuesta general de la mezcla por lo tanto influyen en los resultados del módulo dinámico.

En el lado de los agregados pétreos, desde hace tiempo se han hecho investigaciones sobre como algunas propiedades afectan al módulo dinámico más que otras. Entre algunas investigaciones realizadas se ha encontrado que el porcentaje de agregados por volumen influye en la rigidez de la mezcla al igual que el porcentaje de vacíos observada. También se ha descubierto que, en cambio de lo anterior, la cantidad de agregado que pasa la malla #200 de la granulometría no muestra considerables cambios en los resultados de los resultados. Un estudio realizado en Louisiana revelo que el tamaño nominal del agregado contribuye en variaciones de las mezclas asfálticas como lo muestra la Ilustración 28, demostrando que a mayor tamaño nominal el resultado de módulo dinámico es mayor.

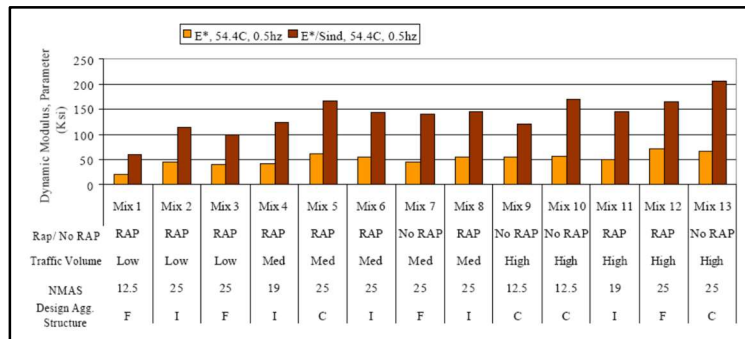


Ilustración 28: Resultados de la prueba de Modulo Dinámico con diferentes mezclas de agregado.



Ilustración 29; Equipo para prueba de Modulo dinámico.



*Ilustración 30; Espécimen en la prueba de modulo dinámico.*

#### 2.3.4) Fatiga

Durante el estudio del comportamiento de la fatiga en mezclas asfálticas, la ocurrencia de estos fenómenos puede ser identificados por los cambios producidos en las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados obtenidos en una prueba de carga cíclica normal pueden ser divididas en tres partes; 1) Una rápida disminución en el módulo dinámico y un incremento en el ángulo de fase. 2) Una fase cuasi estacionaria donde los cambios producidos en estos parámetros son pequeños. 3) Una rápida disminución del módulo dinámico y un aumento del ángulo de fase. El estudio del comportamiento de este fenómeno se debe abordar tomando en cuenta los desarrollos y cambios que sufren los materiales de la mezcla asfáltica durante el proceso de prueba. Uno de los efectos causados por las deformaciones permanentes que aparecen durante el proceso de carga cíclica, lo que a su vez conduce fatiga. Mientras que estas deformaciones no se consideran un daño por fatiga, el que aparezcan cambia las propiedades viscoelásticas de los materiales, haciéndolos más elásticos y rígidos debido al fenómeno de endurecimiento por deformación y por lo tanto pueden ejercer una influencia significativa en su respuesta mecánica. Este tipo de pruebas no reproduce las mismas condiciones de carga que afectan a la mezcla durante su vida de servicio, por lo tanto, se obtienen

diferencias significantes entre las predicciones de vida fatiga y las reales vida a fatiga en campo.

Otro aspecto que limita el análisis de fatiga en mezclas asfálticas es la presencia de otro fenómeno que coexiste con el daño durante el ciclo de carga, por ejemplo, el calor, que es causado por la fricción molecular durante el proceso de carga; esto produce un rompimiento en la cadena debido a la expansión y a la consecuente reducción de las fuerzas intermoleculares. Por otro lado, tenemos el efecto de la *tixotropía* que durante el proceso de carga provoca un cambio progresivo en el material asfáltico de un gel a una estructura sol (asignado a la disociación y la deformación de los enlaces inter e intramoleculares.) lo que reduce la viscosidad y el módulo del material. Otro de los factores que dificultan el análisis de la respuesta por fatiga de la mezcla asfáltica es la selección de un criterio de falla preciso.

Esta metodología de prueba para medir la fatiga, tiene como objetivo medir los movimientos producidos a nivel molecular y de enlace. Esta prueba reproduce las condiciones que conducen a la aparición de las grietas de fatiga en el pavimento (cargas del tráfico y gradientes térmicos), utilizando un dispositivo simple con soporte deslizante y dos elementos elásticos debajo de una placa de soporte. Se usan cuatro transformadores diferenciales de variación lineal (uno horizontal y uno vertical en cada lado del espécimen) en orden para controlar los desplazamientos verticales y horizontales producidos en el material en cada ciclo de carga. Basadas en muestras tomadas, dos diferentes tipos de desplazamientos pueden observarse en cada dirección (horizontal y vertical) y un ciclo de carga: un desplazamiento permanente es el que después del ciclo de carga este desplazamiento es permanente y está relacionado con las deformaciones no recuperables o el daño producido en el material; y el desplazamiento relativo y este está relacionado a la consistencia o el estado de daño del material en el ciclo de carga dado. Si se usan los dos desplazamientos producidos en cada ciclo de carga para un análisis combinado, es posible conducir una evaluación más precisa de la evolución del daño por fatiga en las diferentes fases donde aparecen los daños. En un lado tenemos la curva de histéresis que describe el desplazamiento relativo producido

en el material para definir la disipación de energía en cada ciclo de carga. En el otro lado tenemos los desplazamientos permanentes que pueden ser usados para definir la variación geométrica del material en la zona donde toma lugar el fenómeno de fatiga. Esta variación en el volumen es calculada de las variaciones en las dimensiones producidas en la dirección horizontal y vertical del material. Durante la primer parte de la prueba, se producen grandes variaciones en la geometría del material debido a la movilidad molecular, y esta se reduce con el número de ciclos de carga debido al aumento de tensión. A pesar de esta considerable variación en la geometría del material, la energía disipada medida en cada ciclo de carga durante la primera parte no cambia correspondientemente. Esto implica que las variaciones producidas en este material de acuerdo a los ciclos de carga no producen daño, así como los niveles de energía disipada no cambian considerablemente en el primer ciclo. El valor de la energía disipada inicial representa la capacidad de movilidad molecular evaluada bajo las condiciones de prueba usadas (frecuencia y temperatura). Como esta energía disipada decrece, el material muestra una baja movilidad molecular y por lo tanto la tensión aplicada en cada ciclo de carga será absorbida en forma de grietas a un nivel molecular. En contraste a esto una alta energía disipada inicial significa que hay una movilidad molecular alta en el material, en este caso la tensión transmitida en cada ciclo de carga produce un rápido desarrollo de deformaciones plásticas y tixotropía, el cual causa una apariencia de grietas graves y eso induce a una falla dúctil en el material.

En la segunda parte de la prueba las variaciones geométricas del material se vuelven muy pequeñas, y la energía introducida en cada ciclo de carga es absorbida mayormente a nivel de enlace. Cuando las uniones intermoleculares comienzan a fracturarse, la cantidad de energía disipada en cada ciclo de carga comienza a incrementar. Finalmente, después de cierto número de ciclos la energía disipada comienza a incrementar considerablemente manteniendo los cambios producidos en la geometría. Por lo tanto, este enfoque permite medir de manera precisa la propagación del daño que aparece en el material en los dos niveles; daño en volumen (micro grietas) y daño localizado (macro grietas). Esta información puede ser muy útil para considerar los daños grandes en la estimación de la vida fatiga, o

por definición un mejor y preciso criterio de falla, esto ofrece un análisis bajo el mismo nivel de daño

Para la fabricación de los especímenes para esta prueba se recomienda que una vez determinada la fórmula de trabajo, se fabriquen vigas de flexión de cuatro puntos, utilizando mínimo tres especímenes los cuales deberán tener un volumen de vacíos de 4 +/- 1.0%.



*Ilustración 31; Espécimen de viga fatiga antes de la prueba.*



*Ilustración 32; Prueba de viga fatiga.*

## Capítulo 3: Desarrollo Experimental

El proyecto CAMIT (Carpeta Alto Modulo Intercapa de Transición) se planeó para el estudio, análisis y selección de un ligante asfáltico para una mezcla asfáltica de granulometría densa que cumplan con las características de una capa de alto modulo una capa resistente a la tensión. Esto reduce a una sola mezcla para cumplir las funciones de las dos mezclas anteriores.

El proceso experimental empezó por conocer las propiedades físicas de los materiales, el diseño volumétrico de las mezclas, hasta llegar a las pruebas de módulo dinámico y fatiga (Ilustración 33).



Ilustración 33; Proceso experimental proyecto CAMIT.

### 3.1) Agregado Pétreo

Los materiales que se ocuparon fueron extraídos del banco de materiales Atlicpac (basalto) ubicado en el Estado de México y fueron proporcionados por la empresa

Ergon Asfaltos México S. de R.L de C.V. (Antes SemMaterials México S. de R.L. de C.V.) al igual que los asfaltos que fueron ocupados en este proyecto. Para el proyecto se ocupó el método del Protocolo AMAAC. Las pruebas ejecutadas fueron las siguientes:

### 3.1.1) Muestreo

Antes de iniciar todas las pruebas al agregado pétreo fue necesario reducir las muestras por cuarteo; en este caso se usó una cuarteadora metálica y se redujo la muestra de 0.095 m<sup>3</sup> hasta solo usar una cuarta parte de ésta.



*Ilustración 34: Cuarteadora metálica para muestreo.*

### 3.1.2) Peso volumétrico del agregado grueso

Para conocer el peso volumétrico del agregado grueso, se cribó la mitad de la muestra cuarteada por la malla #4 para separar las partículas finas de las gruesas. Con las partículas gruesas se llenó un recipiente de volumen y peso conocido. Se registra el peso obtenido y es nuestro Peso de recipiente y muestra seca y suelta. Después se vacía el recipiente y se comienza a llenar con el material grueso a cada tercer parte de la altura del recipiente y usando una varilla de acero con punta de bala se compacta en forma de espiral con 25 golpes de la parte exterior al centro del cilindro, así hasta llenar el recipiente, se pesa y se registra el valor como Peso de recipiente y muestra seca compacta y se calcula el Peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico seco compacto del agregado grueso.

$$\gamma_{seco\ suelto} = \frac{\text{Peso del recipiente con muestra suelta} - \text{Peso del recipiente Vacio}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$\gamma_{seco\ compacto}$

$$= \frac{\text{Peso del recipiente con muestra compacta} - \text{Peso del recipiente Vacio}}{\text{Volumen del recipiente}}$$



Ilustración 35: Compactación en recipiente para calcular el peso volumétrico seco compacto.

### 3.1.3) Peso volumétrico del agregado fino

Se ocupa el material que paso la malla #4 en la prueba del peso volumétrico del agregado grueso y se separa lo necesario para la prueba. Para esta prueba se usa el mismo método que en el agregado grueso, solo cambiando el tamaño de las partículas.

$$\gamma_{seco\ suelto} = \frac{\text{Peso del recipiente con muestra suelta} - \text{Peso del recipiente Vacio}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$\gamma_{seco\ compacto}$

$$= \frac{\text{Peso del recipiente con muestra compacta} - \text{Peso del recipiente Vacio}}{\text{Volumen del recipiente}}$$



Ilustración 36: Compactación de agregado fino para cálculo de peso volumétrico seco compacto.

### 3.1.4) Densidad del agregado Grueso.

Para analizar esta propiedad física del material, es necesario cribar el agregado pétreo por la malla No. 4 esto para separar el agregado fino y grueso, seguido de esto se lavó y se separó la muestra según su tamaño nominal de (19 mm) a 3 kg como lo indica la ilustración 34. Después de esto de seco la muestra hasta llegar a un peso constante, esto toma un tiempo de 2 horas en el horno seco para garantizar el peso constante de la muestra. Con la muestra ya seca y limpia se sumerge en agua por 24 horas más menos 4 horas. Con la muestra seca se toma el dato de su peso en estado seco y se continua a tomar el dato del peso sumergido en agua. Después de tomar el peso sumergido se procede a dejar el material superficialmente seco con ayuda de una toalla parcialmente húmeda, esto para lograr que el agregado grueso no pierda tanta humedad y se pueda tomar su peso en superficialmente seco. Seguido de esto se aplica la formula siguiente para encontrar el valor de la densidad del agregado grueso.

Tamaño Nominal, mm	Peso mínimo, kg
25	4
19	3
12.5	2

Ilustración 37; Tabla para reducción de las muestras según el tamaño nominal del agregado.

$$\text{Densidad Relativa (Secado al horno, } G_{sb}) = \frac{\text{Peso al aire del material seco}}{\text{Peso al aire SSS} - \text{Peso sumergido}}$$

$$\text{Densidad Relativa(SSS)} = \frac{\text{Peso al aireSSS}}{\text{Peso al aireSSS} - \text{Peso sumergido}}$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente} = \frac{\text{Peso al aire del material seco}}{\text{Peso al aire del material seco} - \text{Peso sumergido}}$$

$$\% \text{Absorción} = \frac{\text{Peso al aireSSS} - \text{Peso al aire del material seco}}{\text{Peso al aireSSS}} \times 100$$



*Ilustración 38: Manera de tomar el peso sumergido del espécimen.*



*Ilustración 39: Secado de material superficialmente, para tomar el peso del material Saturado Superficialmente Seco.*



*Ilustración 40: Material pétreo después de secado al horno.*

### 3.1.5) Densidad del agregado Fino

Del material que se separó con la malla No. 4 se reduce la muestra hasta 1 kg aproximadamente y se seca hasta llegar a un peso constante. Con el peso obtenido se satura el material hasta el 6% de humedad por 24 más menos 4 horas, pasado el tiempo se prepara el material para comprobar que se encuentre en la condición de saturado y superficialmente seco. Para comprobar lo anterior se extiende el material sobre una superficie no absorbente, y se coloca el material en el cono hasta el borde y se amontona material extra en la superficie, después con se deja caer el pisón metálico desde una altura de 5mm sobre la superficie del cono 25 veces y

después se levanta el cono con un movimiento vertical ininterrumpido, y de manera visual se comprueba si el material llegó a la condición deseada. Seguido de esto se utiliza un picnómetro y se llena parcialmente con agua y se agregan 500 más menos 10 gramos del agregado fino que ya se había probado, y se agita por 15 minutos hasta eliminar las burbujas de aire que tenga la muestra y se llena hasta la marca que tiene el picnómetro con agua con una temperatura de 23 más menos 2°C y se registra la masa de la muestra. Después de registrar la masa se saca el material del picnómetro y se seca, se toma registro de esta masa de la muestra seca y se toma registro de la masa del picnómetro con agua hasta la marca anterior donde se llenó. Ya con estos datos registrados, se calcula la densidad ocupando las fórmulas:

*Densidad Relativa (Secado al horno, Gsb)*

$$= \frac{\text{Masa Agregado Seco}}{(\text{Masa de picnómetro con agua} + \text{Masa Agregado SSS}) - \text{Masa picnómetro y muestra sumergida}}$$

*Densidad Relativa (Saturado y Superficialmente Seco)*

$$= \frac{\text{Masa Agregado SSS}}{(\text{Masa de picnómetro con agua} + \text{Masa Agregado SSS}) - \text{Masa picnómetro y muestra sumergida}}$$

*Densidad Relativa Aparente (Gsa)*

$$= \frac{\text{Masa Agregado Seco}}{(\text{Masa de picnómetro con agua} + \text{Masa Agregado Seco}) - \text{Masa picnómetro y muestra sumergida}}$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Masa Agregado SSS} - \text{Masa Agregado Seco}}{\text{Masa Agregado Seco}} \times 100$$



*Ilustración 41: Llenado de cono para revisar la humedad óptima en el agregado fino.*



*Ilustración 42: Compactación de material dentro del cono.*



*Ilustración 43: Llenado de matraz con material fino.*

### 3.1.6) Desgaste de los Ángeles

Se lava y se seca una parte del agregado pétreo y se prepara la masa de agregado según la granulometría que obtuvimos, y se registra el peso real. También dependiendo de la granulometría que tenemos sabremos qué cantidad de esferas de metal son necesarias para la prueba. Conociendo los materiales necesarios se procede a realizar la prueba en la máquina de desgaste de los ángeles por 500 revoluciones. Terminada las revoluciones se separan las esferas del agregado, se lava y se criba por la malla del No. 12 y se seca hasta peso contante y se registra este último, y con estos datos se calcula el desgaste generado.

Tamaño de Mallas Pasa-Retiene	A	B	C	D
1 ½" – 1"	1250 ± 25			
1" – ¾"	1250 ± 25			
¾" – ½"	1250 ± 25	2500 ± 10		
½" – 3/8"	1250 ± 25	2500 ± 10		
3/8" – ¼"			2500 ± 10	
¼" - #4			2500 ± 10	
#4 - #8				5000 ± 10
<b>PESO TOTAL INICIAL</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>	<b>5000 ± 10</b>

Ilustración 44; Masa inicial según la masa de agregado grueso que pasan y retienen los tamices.

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga abrasiva, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Ilustración 45; Numero de esferas a usar según la granulometría a usar.

$$\% \text{Desgaste Los Angeles} = \frac{\text{Masa Inicial de la muestra} - \text{Masa seca final}}{\text{Masa Inicial de la muestra}}$$



Ilustración 46: Equipo para desgaste los Ángeles.



Ilustración 47: Esferas de abrasión para la prueba.

### 3.1.7) Microdeval

Para esta prueba se necesita separar una muestra según la granulometría del agregado pétreo, en este caso se separar conforme a la ilustración 37 y se sumergió esta muestra en 2 litros de agua por 1 hora en el contenedor metálico. Pasando este tiempo se colocan 5000 g de balines de acero y se comienza el ensaye por un lapso de 10500 revoluciones. Terminado el proceso se vierte la muestra ensayada y se lava con las mallas #4 y #16 sobrepuestas desechando las partículas más finas que la malla del #16. Y con la muestra lavada y cribada se pone a secar hasta peso constante registrando el peso final y calculando el desgaste conforme al peso inicial.

TAMAÑO NÓMINAL = 3/4"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
3/4" - 5/8"	375
5/8" - 1/2"	375
1/2" - 3/8"	750
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

TAMAÑO NÓMINAL = 1/2"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
1/2" - 3/8"	750
3/8" - 1/4"	375
1/4" - #4	375
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

TAMAÑO NÓMINAL = 3/8"

Malla Pasa - Retiene	Masa, g
3/8" - 1/4"	750
1/4" - #4	750
<b>TOTAL</b>	<b>1500 ± 5</b>

Ilustración 48; Masa según el tamaño nominal de la muestra y como se debe separar para la prueba.

Tamaño Nominal	Duración, rpm
3/4"	12,000 ± 100
1/2"	10,500 ± 100
3/8"	9,000 ± 100

Ilustración 49; Duración de la prueba en revoluciones por minuto según el tamaño nominal de la muestra.

$$\% \text{Desgaste Microdeval} = 100 \times \frac{\text{Masa inicial de la muestra} - \text{Masa final seca}}{\text{Masa inicial de la muestra}}$$



*Ilustración 50: Equipo para prueba Microdeval.*



*Ilustración 51: Balines usados en la prueba.*

### 3.1.8) Partículas planas y alargadas

Esta prueba puede hacerse mostrando resultados en cantidad de partículas o en peso de las partículas, y en este espécimen se expresaron resultados en peso. Y para empezar se secó una muestra del agregado grueso hasta peso constante, y se cribó por la malla 3/8" hasta obtener un peso de 750.2 g y se separan las partículas de la muestra en la relación 1:3 que se encuentra marcada en un instrumento especial para la prueba, separando las partículas en tres grupos; 1) Partículas Planas, 2) Partículas Largas y 3) partículas planas y alargadas. Se separa

toda la muestra se pesa los grupos separados para calcular el porcentaje de cada uno en el total del espécimen.



*Ilustración 52: Procedimiento de selección de partículas planas y alargadas por medio de un calibrador de espesores.*

### 3.1.9) Caras fracturadas

Para esta prueba es necesario separar el material por la malla #4 y preparar la muestra según el tamaño nominal del agregado y el peso mínimo que se indicó, para la prueba tomamos una muestra de 747.2 g pues tenemos un tamaño nominal de 12.5 mm (media pulgada) y nos indica un mínimo de 500 g. Teniendo nuestra muestra preparada, se separan las partículas en 3 grupos; 1) partículas con 0 caras fracturadas, 2) partículas con 1 cara fracturada y 3) partículas con 2 o más caras fracturadas. Para dividir cada partícula se esparcieron sobre una superficie plana y se identifican las caras por las aristas que aparecen en la superficie, y forman algún tipo de forma geométrica. Terminado de separar todas las partículas se registra el peso de la masa de cada grupo y se calcula el porcentaje de cada cara en la muestra.

Tamaño nominal	Tamaño mínimo, g
25	3,000
19	1,500
12.5	500
9.5	200

*Ilustración 53;Tamaño mínimo de la masa de la muestra según el tamaño nominal del agregado.*

$$\%Caras Fracturadas = 100x \frac{PSC}{PSC + PNC}$$

PSC = Partículas que si cumplen el criterio de numero de caras fracturadas

PNC = Partículas que si cumplen el criterio de numero de caras fracturadas



*Ilustración 54: Revisión de caras fracturadas.*

### 3.1.10) Equivalente de Arena

Esta prueba es necesaria para conocer la cantidad de arcilla que tiene el agregado fino. Se separa material que pase por la malla No. 4 hasta obtener un mínimo de 1500 gr. Después para seleccionar el espécimen se humedece el material para evitar la segregación de finos y hasta llegar a un contenido óptimo de agua para trabajar el espécimen, seguido de esto se forma un cono con el material y se toma el espécimen con un recipiente metálico con medida conocida, iniciado de la base del cono hacia arriba y se presiona manualmente. Con el espécimen preparado se llena una probeta con 4" de solución de trabajo, y con ayuda de un embudo se introduce el espécimen de material fino en la probeta. Para eliminar las burbujas y ayudar a humedecer el espécimen, se golpea suavemente la base de la probeta evitando salpicar la solución de trabajo y se deja reposar 10 min. Terminado el tiempo de reposo, se tapa la probeta y se agita la muestra para desprender el material de la base y se coloca en un agitador mecánico por 45 segundos. Terminando de agitar, sin perder tiempo, se destapa la probeta y se comienza a irrigar la probeta de forma firme y vertical de arriba hacia abajo haciendo que el material que se encuentra en las paredes de la probeta descienda y al llegar a la base de esta se hacen pequeños piquetes al espécimen para lavar las partículas más finas, y se retira poco a poco subiendo la cantidad de solución de trabajo hasta 15" de la probeta, y se deja reposar por 20 minutos. Con el tiempo de reposo concluido se toma la lectura de arcilla directamente de la probeta, y se coloca un pisón dentro de la probeta bajándolo lento y sin golpear la probeta, y se toma la lectura de arena.

$$\%Equivalente\ de\ Arena = 100x \frac{Lectura\ de\ Arena}{Lectura\ de\ Arcilla}$$



*Ilustración 55: Llenado de probeta con la solución de trabajo.*



*Ilustración 56: Material fino vertido en la probeta con la solución de trabajo.*



*Ilustración 57: Irrigación de la probeta con solución de trabajo en la probeta.*



*Ilustración 58: Probeta con pisón para lectura de valores de arena y arcilla.*

#### 3.1.11) Azul de metileno

La prueba se realiza para conocer la reactividad de las partículas más finas del agregado. Para esto se separó material fino y se pasó por las mallas hasta llegar a la malla 200 y obtener al menos 5 g. Se prepara un vaso de precipitado con capacidad de 50 ml y se agregan 30 ml de agua destilada y 1 g del material que pasamos por la malla 200, y se agita de vigorosamente utilizando un agitador magnético y una barra agitadora. Con ayuda de una de una bureta graduada de 50 ml se colocó la solución de azul de metileno y se colocó en suspensión sobre el vaso de precipitado con el espécimen. Ya con el espécimen se agrega una gota de la solución de azul de metileno y se deja agitar con el agitador magnético por un minuto, pasado el minuto se toma una gota con la barra agitadora como muestra y se coloca y se coloca sobre papel filtro, se observó la gota para identificar un halo azul que nos confirma el valor del azul de metileno, de no aparecer el halo, se vuelve a colocar 1 gota de solución de azul de metileno y se deja agitar por un minuto. Se continuará este procedimiento hasta que se logre encontrar el halo azul. Cuando aparezca dicho halo se deja agitar por 4 minutos más sin agregar más solución de azul de metileno y se vuelve a comprobar si aparece el halo y así confirmar el valor

de azul de metileno y se reporta la cantidad de mililitros usados hasta antes de agitar por 4 minutos.



*Ilustración 59: Prueba de azul de metileno en proceso, con base agitadora y probeta.*

### 3.1.12) Angularidad del agregado fino.

Esta prueba se realiza para conocer como afectara en el contenido de vacíos la forma del agregado fino, mientras tenga más forma angular más vacíos en la mezcla se encontrarán y viceversa. Para esta prueba se lava la muestra con la malla No. 200 y se seca el material hasta llegar a peso constante, después se separa el material según el procedimiento hasta llegar a 190 gr, en este caso se usó el método A (ilustración 41), se homogenizo y se colocó en el embudo de la herramienta para la prueba, se tapó la abertura de este usando un dedo, y también usando una espátula se enrazo la parte superior de embudo. Se retira el dedo del embudo para producir la caída libre del material dentro de un recipiente cilíndrico de volumen y peso conocidos, al terminar de caer el material se golpea un par de veces el cilindro para confinar el material y al moverlo evitar el derramamiento de la muestra. Después de pesar el cilindro con material, ser vuelve a combinar el material que se pesó y el excedente y se realiza la prueba una vez más y se registran los resultados con una décima de aproximación.

Para obtener el resultado se necesita conocer la gravedad específica del material y se usa la siguiente fórmula para conocer el valor de la angularidad del agregado fino, y se reporta el resultado con una décima de proximidad.

Método A

Mallas Pasa- Retiene	Peso, g
#8 - #16	44 ± 0.2
#16 - #30	57 ± 0.2
#30 - #50	72 ± 0.2
#50 - #100	17 ± 0.2
TOTAL	190

Método B

Mallas Pasa- Retiene	Peso, g
#8 - #16	190 ± 1
#16 - #30	190 ± 1
#30 - #50	190 ± 1

Método C

Mallas	Peso, g
Pasa # 4	190 ± 1

*Ilustración 60; Separación de la muestra para conformar la masa a ensayar, según el método que se elija.*

*%Angularidad del Agregado fino*

$$= 100x \frac{\text{Vol. Cilindro} - \frac{\text{Masa Agregado fino en cilindro}}{\text{Densidad Especifica seca de agregado fino}}}{\text{Vol. Cilindro}}$$



*Ilustración 61: Equipo para angularidad del agregado fino.*

### 3.1.13) Granulometría del agregado grueso y fino.

La granulometría es una prueba que se realiza en ambas partes del agregado pétreo para conocer el porcentaje de tamaños con la que está compuesto nuestro agregado. Para esto se separaron una muestra de agregado grueso y una mas pequeña de agregado fino, separada por la malla No. 4. Seguido de esto se criba el material a través de los tamices con diferentes mallas según sea el agregado por analizar, para el agregado grueso se usan desde la malla de 1/2", 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200. Y para el agregado fino se comienza con la malla No. 4 hasta llegar a la No. 200. Para esto se apilan los tamices de mayor apertura a menor, en orden descendente, y colocando un recipiente liso después del último tamiz. Para comenzar el procedimiento se coloca la muestra en el primer tamiz evitando que se desborde por los lados, se tapa para que las partículas más pequeñas no se escapen, y se comienza a dar un movimiento oscilatorio para que las partículas pasen por las mallas de cada tamiz, y queden separadas según su tamaño. Después de que se detiene el movimiento se comienzan a separar los matices para ir tomando el peso que quedo en ellos, evitando que las partículas caigan fuera de la balanza donde se está tomando el peso de la muestra. Para mejorar el retiro del material de las mallas se usa un cepillo con cerdas metálicas para los matices que están entre la malla No.4 y No. 50, mientas que para los matices con malla No. 100 y No, 200 es mejor usar cerdas más suaves y delgadas de plástico u otro material que no dañe la malla del tamiz. Después de tomar el peso retenido en cada uno de los matices y también de las partículas que pasaron la malla No. 200, se calcula el porcentaje que es cada una de estas al total de la muestra.

Para terminar, se compara la granulometría resultante del procedimiento con los puntos de control que nos presenta el protocolo AMAAC y se procede a utilizar esta en el diseño volumétrico de la mezcla.



*Ilustración 62: Llenado de tamices con el material.*



*Ilustración 63: Movimiento de los tamices para que baje el material por las aperturas.*

### 3.2) Cemento asfáltico

Para el proceso experimental se ocuparon cuatro asfaltos:

- AC-20
- ACO276-P
- ACO #005-16
- ACO 210S (ASFALTO PROTOTIPO)

Antes de comenzar el proceso de mezclado es necesario conocer las temperaturas de mezclado y de compactación del cemento asfáltico para poderlo manejar y que la mezcla resultante con el material pétreo tenga la consistencia y adherencia correcta. Este dato se encuentra en la carta de viscosidad del cemento asfáltico, en esta se compara el cambio la temperatura del asfalto contra su efecto en la viscosidad de este. En todos los asfaltos mientras mayor sea la temperatura que tenga más viscoso se vuelve, pero no todos tienen las mismas temperaturas de

mezclado y compactación pues están compuestos por diferentes modificadores que los pueden hacer más duros o menos duros.

Cada uno de estos se probaron en las mismas pruebas y con el mismo material aun cuando se tomaron como datos comparativos sus anteriores resultados en las pruebas de fatiga y modulo dinámico excepto el del asfalto ACO 210S ya que este fue diseñado como prototipo para el proyecto CAMIT.

### 3.3) Diseño Volumétrico

#### 3.3.1) Elaboración de mezclas

Conociendo las temperaturas de mezclado y compactación, el material pétreo y el material asfáltico deben de tener la misma temperatura en el momento de que inicia el proceso de mezclado. Para que el material completo tenga la misma temperatura se usan hornos eléctricos que mantengan los materiales a la temperatura necesaria. Para asegurar que el material no disminuirá menos de la temperatura de mezclado los materiales permanecen 2 horas continuas dentro del horno (Ilustración 64 e Ilustración 65), y hasta cumplido este lapso de tiempo se comienza con el proceso de mezcla de los materiales, de la manera más rápida para evitar que se pierda mucha temperatura, cuidadosa para no perder agregado fino, cabe mencionar que para la mezcla se debe elegir un lugar en el laboratorio, donde no se sientan corrientes de aire que afecten el peso de la muestra. Teniendo los datos del material pétreo y la curva granulométrica, se continuó con la selección del contenido óptimo de asfalto para esta propuesta granulométrica. Para esto se armaron 3 muestras de agregado con un peso de 4500 gr. Y una muestra de 3000 gr. Las primeras 3 se mezclaron con diferentes porcentajes de asfalto 4.5%, 5%, y 5.5% de asfalto respecto al peso total del agregado. La segunda muestra se mezcló con el 5% de asfalto y se dividió en 2 muestras de 1500 gr cada una después de mezclarse.

Se uso como equipo de mezclado una olla especial de acero con una base especial con un hueco para embonar en el motor de la mezcladora y que sea resistente a altas temperaturas, una paleta especial de mezclado que embone perfectamente en la mezcladora y sea resistente a altas temperaturas. Ya que se debe evitar la disminución de la temperatura en cuanto a los materiales pétreos y asfálticos,

también fue necesario que la olla y la paleta usados estuvieran a la misma temperatura que los materiales, garantizando que la mezcla continuara en la temperatura marcada en la carta de viscosidad.



*Ilustración 64: Material asfáltico y herramientas que se usan en mezclado.*



*Ilustración 65: Agregado pétreo en el horno para que alcance la temperatura de mezclado del asfalto.*

Ya con la temperatura adecuada se comienza el proceso de mezclado, primero para cuidar la temperatura de los materiales, se saca la olla y se coloca en una báscula con capacidad de 25 kg y se tara la báscula y se agregaron los materiales pétreos obteniendo su peso, y dependiendo del porcentaje de asfalto elegido se realiza el cálculo usando la siguiente fórmula:

$$C.A. (gr) = \frac{PESO\ DEL\ AGREGADO\ (gr) * PORCENTAJE\ DE\ ASFALTO\ (\%)}{100}$$

Como recomendación de parte de los laboratoristas con experiencia se puede aumentar unos 2 o 3 gr de asfalto por el desperdicio que se queda en las diferentes herramientas después del mezclado. Después de que ya está pesado el agregado y el asfalto se comenzó a mezclarlos en la mezcladora mecánica y la paleta que también se encontraba en el horno, por el tiempo necesario a una velocidad de hasta que la mezcla asfáltica se vio lo más homogénea posible y sin que se enfriara demasiado. La mezcla se deberá poner de nuevo en charolas con algún material que no permita que se pegue en el molde donde se pondrá. Se vació la mezcla en una charola donde no se derramará y cupiera de nuevo en el horno, para simular el proceso de envejecimiento de la mezcla durante la producción, 2 horas a la temperatura de compactación que marca la carta de viscosidad del asfalto.

### 3.3.2) Gravedad teórica suelta (Gmm)

La mezcla de 3000 gr se separa en dos charolas con 1500 gr cada una pues esta mezcla se usó para conocer la Gravedad teórica suelta (Gmm). Esta mezcla también se dejó envejecer y después se sacó del horno a que bajara su temperatura y se secase, para empezar a separar las partículas con las manos separando así las partículas grandes y pequeñas con una medida de máximo de 6mm y se esperó a que esta mezcla estuviera en temperatura ambiente para poder continuar con su ensaye. Ya con la temperatura adecuada se colocó la muestra en un picnómetro de ensaye y se tomó su masa (Ilustración 66). Seguido de esto se agregó agua a una temperatura de 25°C y se cubrió con la tapa del picnómetro y se colocó en un agitador mecánico con una frecuencia constante. En el momento que se comenzó a poner el agitador en funcionamiento, se aplicó presión de vacío con incremento gradual hasta alcanzar  $27.5 \pm 2.5$  mm de Hg en un periodo de 2 minutos. Se continuó la aplicación de la presión por  $15 \pm 2$  min. Al terminar este periodo se retiró la presión aplicada de forma manual y la tapa del picnómetro. Se peso el picnómetro con muestra y agua en suspensión dentro de una tina con agua a temperatura de 25°C sin que el material se salga del picnómetro. Se dejó en suspensión hasta que la

balanza deje de mostrar variación en el peso que aproximadamente tardo 4 min. Luego de esto se comparan los pesos del material usando la siguiente formula.

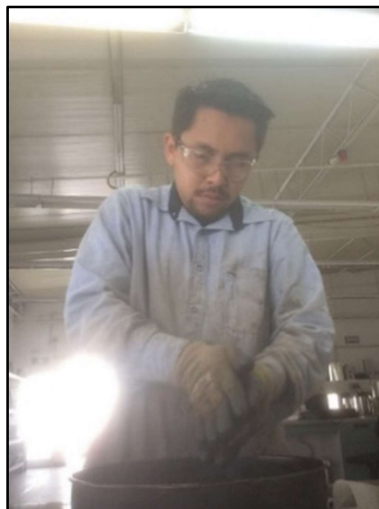
*Gmm*

$$= \frac{\text{Masa de mezcla}}{\text{Masa de mezcla} - (\text{Masa de muestra suspendida} - \text{Masa picnometro sumergido})}$$

Este dato, nos servirá después para conocer el contenido de vacíos en los especímenes.

### 3.3.3) Compactación de especímenes y cálculo de contenido óptimo de asfalto.

En cuanto a las mezclas con contenidos diferentes de asfalto que se encontraban en el horno se compactaron en un compactador giratorio a 100 giros. Para la compactación se necesitaron moldes de 150 mm de diámetro y al igual que el equipo de mezclado, se tuvieron que calentar también a la misma temperatura que compactación se necesitaron moldes de 150 mm de diámetro y al igual que el equipo de mezclado, se tuvieron que calentar también a la misma temperatura que compactación se necesitaron moldes de 150 mm de diámetro y al igual que el equipo de mezclado, se tuvieron que calentar también a la misma temperatura que la mezcla en el horno, para que al hacer contacto no se pierda la temperatura



*Ilustración 66: Proceso de desgrane del material mezclado para el Gmm*

de compactación marcada en la carta de viscosidad. Los moldes para el compactador giratorio tienen una placa que es removible la cual debe quedar debajo de la mezcla cuando se le coloque y embonar con el compactador giratorio. Antes de colocar la mezcla en el molde este debe ser lubricado con un material antiadherente para que el espécimen después de ser compactado pueda salir del molde sin perder material ni forma. Ya lubricado y habiendo colocado también un filtro en la parte inferior interior del molde también lubricado, se sacó la mezcla del horno y se colocó en el molde tratando que no queden vacíos grandes en ella y que toda la masa del material quede dentro y no varié el peso de los especímenes, y terminando se le pone también un filtro encima para que la mezcla no se quede pegada en la parte superior del compactador giratorio. Se coloca en el compactador giratorio el molde con la mezcla asfáltica y se inició el proceso de compactación.

Antes de que se iniciara la preparación de la mezcla y el molde, el compactador giratorio debe estar programado para compactar hasta 100 giros y no a una altura en específico. Esto se hace antes para evitar que en el proceso de programación la mezcla pierda su debida temperatura de compactación.

En cuanto el compactador giratorio termino de compactar la mezcla el molde se retiró y se sacó el espécimen ya compactado del molde y se dejó secar por al menos 24 horas para que al maniobrar con el no perdiera masa por aun estar fresco. Este procedimiento se repitió en todas las mezclas que se prepararon para la elección del contenido óptimo de asfalto.

#### 3.3.4) $G_{mb}$

Con los especímenes ya en temperatura ambiente fue necesario conocer el porcentaje de vacíos en la muestra, y para esto es necesario conocer la Gravedad especifica neta del espécimen ( $G_{mb}$ ), usando la siguiente formula:

$$G_{mb} = \frac{\text{Peso seco del espécimen}}{\text{Peso saturado superficialmente seco} - \text{Peso sumergido en agua}}$$

El peso seco se obtuvo directamente de pesar el espécimen en la báscula. El peso siguiente a obtener por cuestiones de metodología y practicidad de la prueba es el

peso sumergido en agua a temperatura de  $25 \pm 1^\circ \text{C}$ , usando un arnés de metálico que se encuentra amarrado a la parte inferior de la báscula y sumergido en agua, se taró la báscula y se colocó el espécimen, esperando un lapso de 3 – 5 min hasta que se estabilice el peso y se anota la cantidad hasta dos décimas (Ilustración 67). Y el último dato que se toma por metodología es el peso saturado superficialmente seco (Ilustración 68). Para obtenerlo fue necesario, antes de retirar el espécimen del agua, preparar una toalla ligeramente húmeda en un lugar cercano a la báscula que se utilizó, esto para no perder demasiada humedad en el espécimen al sacarlo del agua y antes de secarlo con la toalla. Al sacar el espécimen se secó superficialmente y rápido con la toalla, y pesarlo en la báscula en un periodo corto de tiempo para no perder la condición de saturado superficialmente seco. Con los datos obtenidos se calculó el valor del  $G_{mb}$  y se repitió el procedimiento hasta obtener los datos de todos los especímenes. Ya conocidos los valores de  $G_{mb}$  de cada espécimen y con el valor del  $G_{mm}$  se calculan los vacíos en cada muestra y se realiza una regla de tres que nos diga la cantidad de asfalto óptimo con la cual tengamos un 4% de vacíos en la mezcla. Ya conocidos los valores de  $G_{mb}$  de cada espécimen y con el valor del  $G_{mm}$  se calculan los vacíos en cada muestra y se realiza una regla de tres que nos diga la cantidad de asfalto óptimo con la cual tengamos un 4% de vacíos en la mezcla. Haciendo el caculo necesario para el agregado y la granulometría usada es de 5.3% de contenido de asfalto óptimo para una cantidad de vacíos de 4%. Con este dato se mezclaron todos los especímenes siguientes sin importar la masa del agregado con la que se harán.



*Ilustración 67: Proceso de medición del peso sumergido del espécimen*



*Ilustración 68: Retiro del espécimen del agua después de tomar el dato.*

#### 3.4) Módulo Dinámico.

La siguiente prueba para conocer las propiedades de la mezcla asfáltica y su asfalto, fue conocer el Módulo Dinámico. Para realizar esta prueba se necesitaron especímenes con medidas de 150 mm de diámetro y 175 mm de alto y con un contenido de vacíos de 7.0% +/- 0.5%. Para esto se hizo una aproximación con una cantidad de agregado y con la misma cantidad de asfalto optimo, y compactándolo a 175 mm de altura con el compactador giratorio. Al conocer el contenido de vacíos se supo si subimos o bajamos la cantidad de masa de agregados, pues a mayor masa, menos contenido de vacíos. En este caso tuvimos un contenido de vacíos mayor a los 7.5% de vacíos (8.1%) con una masa de 6000 gr. Entonces se aumentó la masa de agregado a 6529 +/- 100 gr, y al compactar la mezcla se comprobó que la mezcla obtuvo 7.4% de vacíos, con esta misma cantidad de masa se mezclaron y compactaron dos especímenes más, para la prueba del módulo dinámico dando en total 3 de cada asfalto que se probó. Antes de someterlos a la prueba de compresión axial, a los especímenes se les saca un núcleo de 100 mm de diámetro y 150mm de alto (Ilustración 69), calculando su contenido de vacíos nuevo. La prueba se realizó en diferentes frecuencias de carga, y a una temperatura de 20°C, para este proyecto solo se probarán los especímenes a esta temperatura, aunque en general la prueba se hace a diferentes temperaturas. Las frecuencias inician de mayor a menor y se observa la deformación provocada,

gracias a los sensores que se colocaron en el espécimen de ensayo (Ilustración 70 e Ilustración 71).



*Ilustración 69: Núcleos del espécimen de módulo dinámico.*



*Ilustración 70: Especimen con sensores colocados para la medición de las deformaciones*



*Ilustración 71: Especimen ya colocado en la prensa para iniciar la prueba.*

### 3.5) Prueba de Fatiga

Tras haber realizado la prueba y haber obtenido los resultados de Módulo Dinámico y ángulo de fase, se elaboraron los especímenes necesarios para la prueba de fatiga.

Para esta prueba se construyen especímenes rectangulares con un peso aproximado de 10,000 gr ocupando el mismo porcentaje de asfalto óptimo, pero en este caso cambian dos factores, uno es la manera de compactar la muestra, pues se usa un compactador lineal de rodillo, y el otro es la cantidad de vacíos que se busca obtener en el espécimen. La compactación por medio del compactador lineal de rodillo necesita que el molde y las placas usadas estén a la temperatura de curado de la mezcla para que se pueda llegar a la altura de compactación que se necesitan, y para obtener los vacíos deseados. El compactador no registra la altura en que se está compactando, mide la presión ejercida por el rodillo en la longitud del molde. Cuando la presión ejercida por el rodillo es constante quiere decir que el espécimen ha llegado a la altura de diseño y probablemente tendrá el porcentaje de vacíos necesarios para la prueba. Después de elaborar el espécimen grande (Ilustración 72), antes de proceder con la prueba de fatiga el espécimen compactado se debe cortar en especímenes más pequeños a los que se les colocarán sensores que medirán las deformaciones causadas en la prueba. La prueba se realiza aplicando ciclos de carga en diferentes frecuencias y a diferentes temperaturas, simulando los ciclos de carga de que se producen en la carpeta por el paso de los vehículos. La prueba se realiza generalmente a frecuencias de 10 Hz y a la temperatura de 20°C. Los resultados que arroja la prueba son los desplazamientos en la viga puesta a esfuerzos a flexión, y se necesita estar lo más cercano a los resultados que se obtienen al probar mezclas con asfalto AC-20 el cual tiene un buen comportamiento a este esfuerzo.



*Ilustración 72: Especimen compacto para la prueba de fatiga.*

## Capítulo 4. Resultados obtenidos en el proceso experimental.

### 4.1) Resumen de resultados del análisis de propiedades físicas de agregados pétreos.

En la tabla 1 se presentan los resultados de las pruebas realizadas en el agregado pétreo, así como los valores especificados en la normativa.

PROPIEDAD FÍSICA	NORMA	FRACCIÓN DEL AGREGADO		ESPECIFICACIÓN
		Arena Triturada	Grava 7/8	
Peso Volumétrico Seco Suelto, kg/m <sup>3</sup>	ASTM C 29	1481.57	1387.06	-
Peso Volumétrico Seco Compacto, kg/m <sup>3</sup>		1666.19	1519.44	-
Gravedad Específica Bruta, Gsb	ASTM C 127	2.64	2.58	> 2.4
Gravedad Específica Aparente, Gsa		2.72	2.74	-
Absorción, %		0.01	0.02	-
<b>PRUEBAS EN EL AGREGADO FINO</b>				
Angularidad, %	AASHTO T 304	41.14%	-	40% mín.
Equivalente de Arena, %	ASTM D 2419	77.00	-	50% mín.
Azul de Metileno, mg/g	AMAAC RA 05	5	-	15 máx.
<b>PRUEBAS EN EL AGREGADO GRUESO</b>				
Desgaste de Los Angeles, %	ASTM C 131	-	13.21%	30% máx.
Micro-Deval, %	AASHTO T 327	-	5%	15% máx.
Intemperismo Acelerado (Sulfato Sodio), %	ASTM C88	-	-	15% máx.
Partículas con 1 Cara Fracturada, %	ASTM D 5821	-	97.76%	100% mín.
Partículas con 2 ó más Caras Fracturadas, %		-	93.70%	90% mín.
Partículas Planas, %	ASTM D 4791	-	5.03%	10% máx.
Partículas Alargadas, %		-	0.49%	10% máx.

Tabla 1: Resumen de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al agregado pétreo, tanto finos como gruesos.

Por los resultados obtenidos se verifico que el agregado pétreo tenía las características de calidad para el proyecto.

### 4.2) Granulometría agregado fino y grueso.

#### Agregado Grueso

Las características granulométricas del agregado grueso se muestran en la tabla 2

Granulometría del Material por Lavado						
Masa inicial de la muestra, g					2284.2	
Masa final de la muestra, g					2272.2	
Masa de pérdida, g					12	
					<b>Error:</b>	<b>0.10%</b>
Tamaño abertura de malla		Peso Retenido, g	Peso Retenido Ajustado, g	Retenido Parcial, %	Retenido Acumulado, %	% Que pasa
mm	plg					
50	2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
37.5	1 1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
25	1"	0	0	0.0%	0.0%	100%
19	3/4"	0	0	0.0%	0.0%	100%
12.5	1/2"	816.6	816.6	35.7%	35.7%	64%
9.5	3/8"	624.3	624.3	27.3%	63.1%	37%
6.3	No. 4	796.5	796.8	34.9%	98.0%	2%
2.36	No. 8	30.1	30.4	1.3%	99.3%	1%
1.18	No. 16	1	1.3	0.1%	99.4%	1%
0.6	No. 30	0.2	0.5	0.0%	99.4%	1%
0.3	No. 50	0.1	0.4	0.0%	99.4%	1%
0.15	No. 100	0.1	0.4	0.0%	99.4%	1%
0.075	No. 200	0.1	0.4	0.0%	99.4%	1%
	Pasa No. 200	0.9	13.2	0.6%	100.0%	0%
<b>Total:</b>		2269.9	2284.2	100%		

Tabla 2: Granulometría del agregado grueso.

## Agregado Fino

Las características granulométricas del agregado fino se muestran en la tabla 3

Granulometría del Material por Lavado						
Masa inicial de la muestra, g					1764.6	
Masa final de la muestra, g					1602.6	
Masa de pérdida, g					162	
					<b>Error:</b>	<b>0.21%</b>
Tamaño abertura de malla		Peso Retenido, g	Peso Retenido Ajustado, g	Retenido Parcial, %	Retenido Acumulado, %	% Que pasa
mm	plg					
50	2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
37.5	1 1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
25	1"	0	0	0.0%	0.0%	100%
19	3/4"	0	0	0.0%	0.0%	100%
12.5	1/2"	0	0	0.0%	0.0%	100%
9.5	3/8"	0	0	0.0%	0.0%	100%
6.3	No. 4	89.5	89.9	5.1%	5.1%	95%
2.36	No. 8	540.4	540.8	30.6%	35.7%	64%
1.18	No. 16	390.8	391.2	22.2%	57.9%	42%
0.6	No. 30	225	225.4	12.8%	70.7%	29%
0.3	No. 50	130.3	130.7	7.4%	78.1%	22%
0.15	No. 100	100.6	101.0	5.7%	83.8%	16%
0.075	No. 200	72	72.4	4.1%	87.9%	12%
	Pasa No. 200	50.7	213.1	12.1%	100.0%	0%
<b>Total:</b>		1599.3	1764.6	100%		

Tabla 3: Granulometría del agregado fino.

Con los datos anteriores se construyó la curva granulométrica basado en los límites propuestos en el Protocolo AMAAC como se muestra en la ilustración 73. La línea roja representa la curva granulométrica utilizada en el proyecto

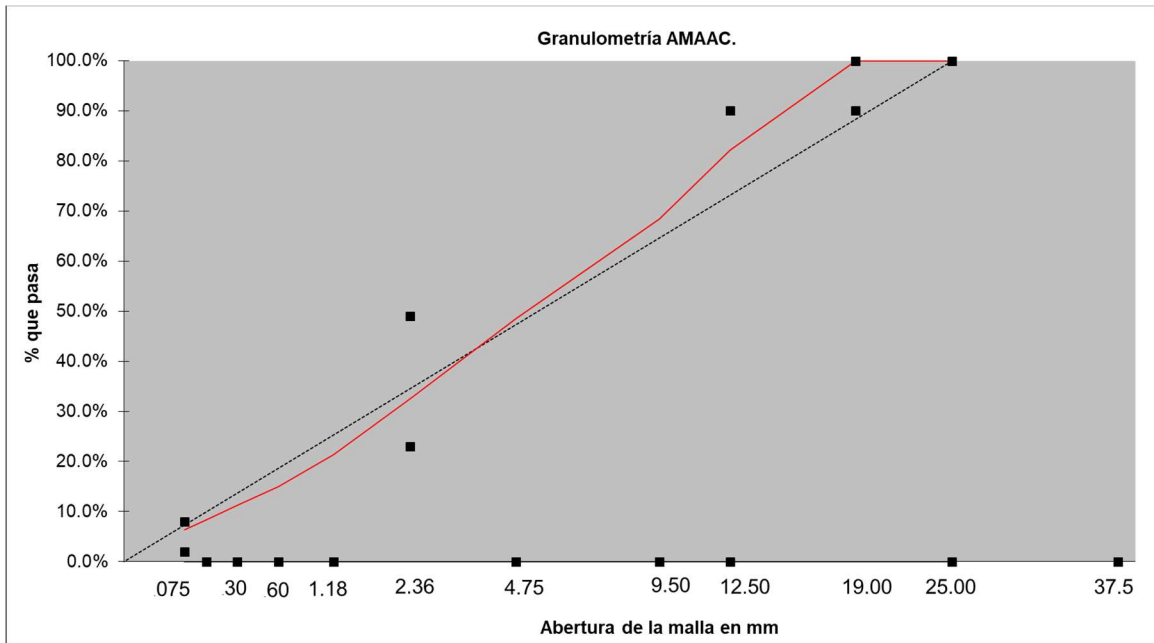


Ilustración 73: Curva granulométrica obtenida según los resultados de las granulometrías. Esta se encuentra dentro de los puntos de control que proporciona el protocolo AMAAC.

#### 4.3) Diseño volumétrico.

Esta parte del proceso experimental se dividió en varios pasos necesarios para conocer el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. La determinación del contenido de asfalto fue realizada una sola vez para las mezclas elaboradas con los diferentes tipos de asfalto. La tabla 4 muestra los resultados de la prueba de densidad máxima teórica de la mezcla (Gmm).

Gmm		
Peso muestra, g	1499.5	1499.1
Peso sumergido picnómetro	1715.6	
Peso sumergido picnómetro+agua+muestra	2606.7	2606.7
<b>Gmm</b>	2.465	2.466
<b>Promedio</b>	<b>2.465</b>	
<b>Desv. Est.</b>	Ok	

Tabla 4: Resultados del cálculo de Gmm para el desarrollo experimental.

No	Diámetro, mm		SELECCION DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO																	
	% C.A.	Peso seco, g	Peso Sumergido, g	Peso S.S., g	Gmb a Ndis medido	Altura a Nini	Altura a Ndis	Gmb est. a Nini	Corr. Gmb a Nini	Gmb a Nini Promedio	% Gmm a Nini	Gmb est. a Ndis	Gmb medido a Ndis promedio	Gmm	% Va	% VMA	% VFA	Pbe	Dp	% Gmm a Ndis
1	4.5%	4892.9	2727.5	4721.3	2.354	130.5	117.3	2.035	2.116	2.121	84.7%	2.284	2.358	2.502	5.8%	13.9%	58.3%	3.6%	1.8	84.2%
2		4895.5	2738.3	4728.7	2.361	130.1	117.1	2.042	2.125			2.289								
3	5.2%	4840.7	2815.3	4851.2	2.378	132.5	118.9	2.067	2.134	2.132	86.1%	2.304	2.378	2.477	4.1%	13.8%	70.6%	4.3%	1.5	85.9%
4		4730.6	2750.3	4742.1	2.375	129.7	116.3	2.064	2.130			2.302								
5	5.9%	4757.8	2782.2	4792.2	2.403	128.8	115.1	2.090	2.147	2.152	87.8%	2.339	2.404	2.452	1.9%	13.4%	85.6%	5.0%	1.3	88.1%
6		4788.9	2781.9	4759.6	2.405	128.9	115.6	2.088	2.157			2.329								

Tabla 5: Calculo de contenido óptimo de asfalto.

No	VERIFICACIÓN CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO																			
	% C.O.A.	Peso seco, g	Peso Sumergido, g	Peso 888, g	Gmb a Ndis medido	Altura a Nini	Altura a Ndis	Gmb est. a Nini	Corr. Gmb a Nini	Gmb a Nini Promedio	% Gmm a Nini	Gmb est. a Ndis	Gmb medido a Ndis promedio	Gmm	% Va	% VMA	% VFA	Pbe	Dp	% Gmm a Ndis
1	5.3%	4737.7	2768.6	4745.1	2.397	130.1	116.5	2.061	2.146	2.150	86.7%	2.301	2.387	2.481	3.40%	13.2%	74.2%	4.4%	1.4	86.6%
2		4744.4	2771.1	4750.9	2.398	125.7	113.0	2.136	2.154			2.376								

Tabla 6: Resultados obtenidos para la verificación del contenido óptimo de asfalto, después de la compactación a 100 giros.

Los datos de Gmm y el contenido óptimo de asfalto, mostrados en la tabla 5 y 6 respectivamente, fueron usados como valores constantes en el desarrollo experimental.

#### 4.4) Modulo Dinámico.

Para esta prueba fueron necesarios tres especímenes de mezcla elaboradas con cada uno de los asfaltos estudiados; el nivel de vacíos de aire en los especímenes de prueba fue de  $7 \pm 0.5$  %.

La tabla 7 muestra los cálculos y resultados que se usaron para la fabricación de los especímenes de módulo dinámico.

TIPO DE ESPECIMEN
Módulo Dinámico

Núcleo	Altura deseada, mm	Diámetro muestra, mm	Volumen Estimado, cm <sup>3</sup>	Altura real, mm	Peso SSS, grs.	Peso sum, grs.	Volumen Estimado, cm <sup>3</sup>	Volumen medido, cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Volumen corregido, cm <sup>3</sup>
1	175	150	3092.5	117	4750.5	2762	2067.6	1988.5	0.9618	2974.3
2			3092.5	117	4750.5	2762	2067.6	1988.5	0.9618	2974.3
									<b>0.9618</b>	<b>2974.3</b>

Gmm	2.465
% Vacios Requerido	7.0%
Gmb deseado	2.292
Contenido Asfalto, %	5.3%

Peso Mezcla, grs.	6895.0
Peso Agregado, grs.	6529.6
Peso Asfalto, grs.	365.4

#### SECCIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS

Espécimen	Peso Mezcla, grs.	Peso Agg., grs.	Peso Asfalto, grs.	Peso Seco, grs.	Peso Sum., grs.	Peso SSS, grs.	Gmb	% Vacios
1	6795.0	6434.9	360.1	6826.2	3891.2	6885.1	2.280	7.5%
2	6895.0	6529.6	365.4	6868.6	3914.7	6924.8	2.282	7.4%
3	6995.0	6624.3	370.7	6853.6	3910.4	6906.9	2.287	7.2%

Tabla 7: Calculo de masa de agregado pétreo para la producción de especímenes de modulo dinámico. En la tabla inferior se muestran los resultados del cálculo de porcentaje de vacíos.

Los especímenes de prueba fueron ensayados a compresión axial con la prueba de modulo dinámico y ángulo de fase. La ilustración 74 muestra los resultados obtenidos en la prueba.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de mezcla asfáltica en la prueba. La mezcla asfáltica con menor desempeño en la prueba fue aquella elaborada con asfalto AC-20 con 5517 MPa de esfuerzo axial y un ángulo de fase de  $17.77^\circ$ . La mezcla con mayor valor de módulo dinámico fue el asfalto prototipo ACO-210S con 8101 MPa de esfuerzo axial con un ángulo de fase de 18.38.

Un valor módulo dinámico más alto representa una mayor rigidez de la mezcla y, por ende, una mayor resistencia a la deformación permanente. Un rango típico de valores de módulo elástico empleado en el diseño de pavimento es de 3,000 a 5,000 MPa.

El ángulo de fase es valor complementario para el cual no existe especificación, sin embargo, permite observar el tiempo de respuesta de la mezcla a la aplicación de carga a la que fue sometida.

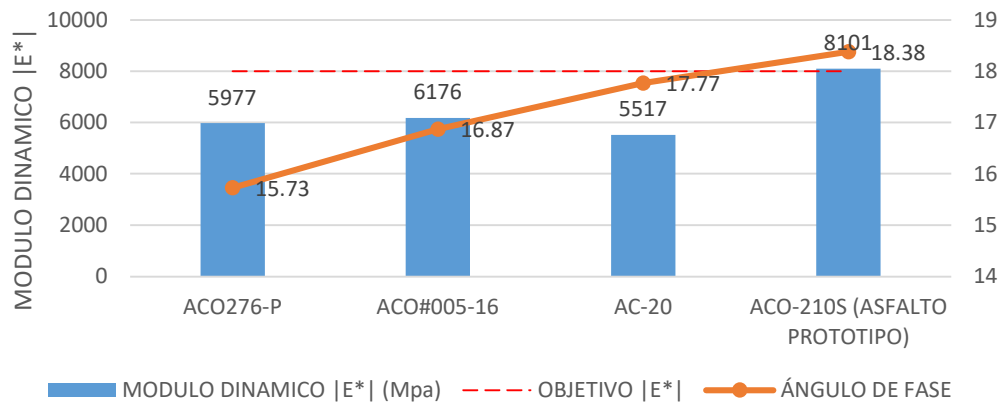


Ilustración 74: Gráfica de resultados de la prueba a compresión axial para módulo dinámico y su ángulo de fase, comparando los cuatro asfaltos.

Estos primeros resultados representaron el primer filtro para la continuación de la investigación. Un valor de módulo dinámico menor a 8,000 MPa fue considerado como resistencia insuficiente para los estándares de calidad del pavimento deseado, es decir, la búsqueda del asfalto apropiado estuvo motivada por obtener altos estándares de calidad en la mezcla, mayores a los convencionales.

Derivado de la anterior, sólo en la mezcla con asfalto prototipo ACO-210S se visualizaron resultados satisfactorios a compresión axial.

#### 4.5) Fatiga

En la prueba de fatiga, especímenes de forma rectangular de 45x15x5 cm son fabricados para cada uno de los asfaltos en la mezcla; el nivel de vacíos de aire seleccionado fue de  $5.5 \pm 0.5$  %. A diferencia de los especímenes cilíndricos del resto de las fases del estudio, estas muestras son compactadas en un compactador lineal con rodillo. La tabla 8 muestra los cálculos y resultados obtenidos para la fabricación de los especímenes de la prueba a fatiga.

Para la ejecución del ensayo vigas de menor tamaño son fabricadas a partir del corte de los especímenes originales. Los resultados de la prueba de fatiga de la viga en 4 puntos se muestran en la ilustración 75.

En la ilustración 75 se puede observar el comparativo directo del comportamiento a fatiga de las mezclas. A un nivel de deformación alta (700  $\mu\text{m}$ ), la mezcla con AC-20 presentó la falla cercana a las 20,000 repeticiones de carga, la mezcla con AC#005-16 a 30,000 repeticiones aprox., la mezcla con ACO-276-P A 70,000 de repeticiones y la mezcla con asfalto prototipo a 100,000 de repeticiones de carga. A una deformación baja (400  $\mu\text{m}$ ), la mezcla con AC-20 presentó la falla cercana a

las 400,000 repeticiones de carga, la mezcla con AC#005-16 a 8,000,000 repeticiones aprox., la mezcla con ACO-276-P A 2,000,000 de repeticiones y la mezcla con asfalto prototipo a 20,000,000 de repeticiones de carga.

TIPO DE ESPÉCIMEN
Fatiga

Datos del Molde	
Largo, cm	45.72
Ancho, cm	15.24
Alto, cm	6.985
Volumen, cm <sup>3</sup>	4867.0

Gmm	2.485
% Vacíos Requerido	5.5%
Gmb deseado	2.329
Contenido Asfalto, %	5.3%
Factor de Corrección	2.50

	Parcial	Total
Peso Mezcla, grs.	11037.3	22074.6
Peso Agregado, grs.	10452.3	20904.6
Peso Asfalto, grs.	585.0	1170.0

#### SECCIÓN VIGAS A FATIGA

VERIFICACIÓN DE PORCENTAJE DE VACÍOS								
Espécimen	Peso Mezcla, grs.	Peso Agg., grs.	Peso Asfalto, grs.	Peso Seco, grs.	Peso Sum., grs.	Peso \$\$\$, grs.	Gmb	% Vacíos
1	10937.3	10357.8	579.7	11008.4	6403	11110.4	2.339	5.1%
2	11037.3	10452.3	585.0	11010.5	6407.4	11122.6	2.335	5.3%
3	11137.3	10547.0	590.3	11010.5	6407.4	11122.6	2.335	5.3%

Tabla 8: Cálculo de masa de agregado pétreo para la producción de especímenes de Viga para fatiga. En la tabla inferior se muestran los resultados del cálculo de porcentaje de vacíos.

Consistentemente, la mezcla con el asfalto prototipo mostró los mejores resultados a baja y alta deformación, mientras que la mezcla con AC-20 tuvo el desempeño más deficiente en ambos casos.

Derivado de la prueba de fatiga, es posible obtener el nivel de deformación que puede resistir la mezcla sin que se presente el fenómeno de fatiga (FEL), es decir el umbral de deformación en el que, teóricamente, si los esfuerzos producidos en el pavimento no superan este valor, no se presentará falla por fatiga en la capa asfáltica.

La ilustración 76 muestra los valores obtenidos de FEL para cada tipo de mezcla. Es posible notar que la mezcla con asfalto prototipo presentó los mejores resultados y el AC-20 los valores más bajos.

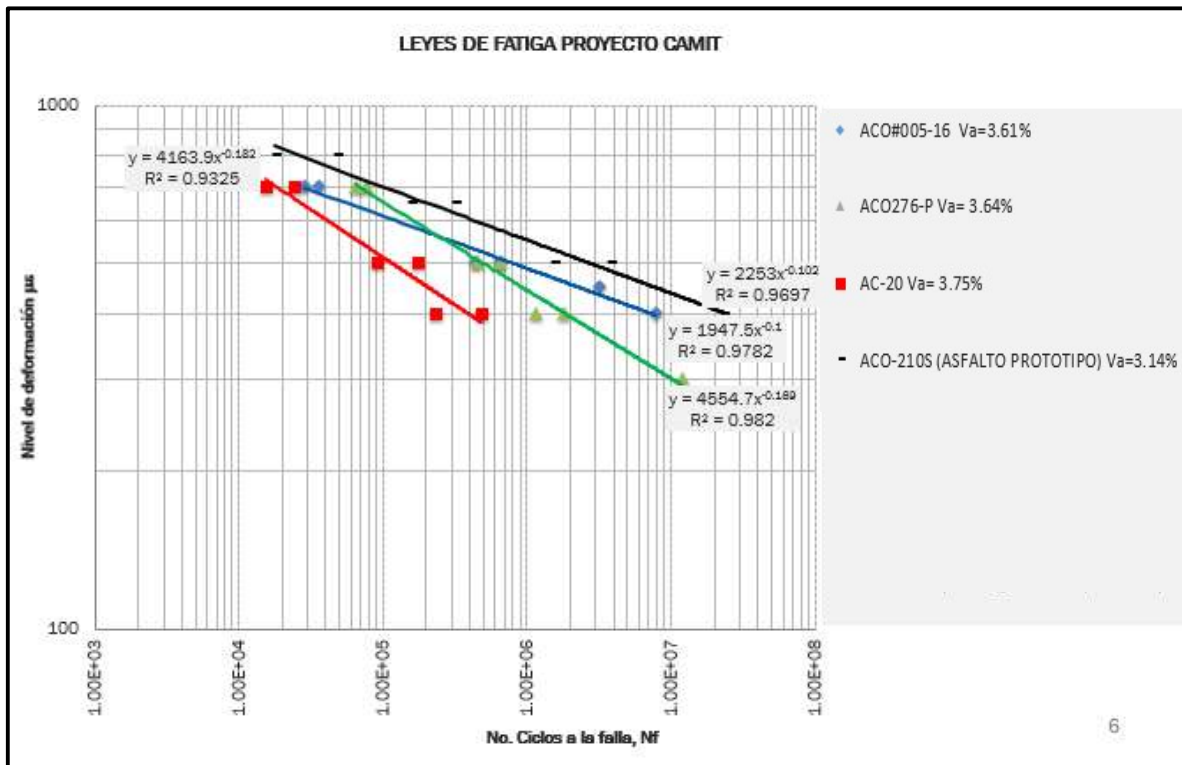


Ilustración 75: Leyes de Fatiga de las cuatro mezclas probadas.

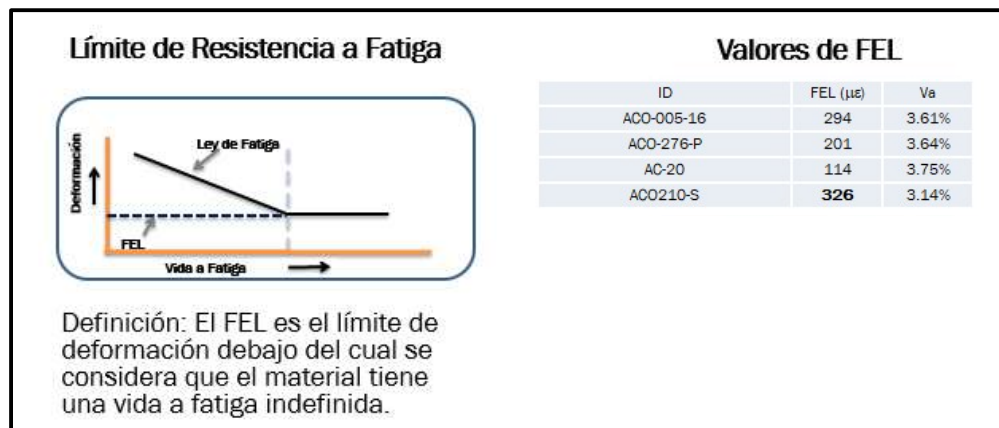


Ilustración 76: Resultados del límite de deformación (FEL) de las mezclas en la prueba a fatiga.

## Conclusiones.

El diseño de un pavimento flexible debe considerar la mayor cantidad de esfuerzos durante el diseño de las capas que lo componen. La deformación permanente está relacionada con la rigidez de la estructura mientras que la fatiga está asociada con la flexibilidad de ésta.

Los diseños de mezcla asfáltica, en la mayoría de los casos actuales, omiten la evaluación de la fatiga y sólo son enfocados en la rigidez.

En este estudio es propuesto un esquema de evaluación para el desarrollo de un producto asfáltico que proveyera las dos cualidades de rigidez y flexibilidad.

Este estudio permitió comprobar la factibilidad de obtener un producto con características mejoradas para elevar la vida útil de los pavimentos.

La metodología recomendada en el Protocolo AMAAC contiene procedimientos más amplios para asegurar el comportamiento de la mezcla asfáltica, por ello, esta metodología fue usada en el proyecto.

En el agregado pétreo seleccionado se obtuvieron las características de calidad apropiadas para la evaluación del efecto de los diferentes productos asfálticos.

La prueba de módulo dinámico por compresión axial fue efectuada para medir la rigidez la mezcla asfáltica y la prueba de fatiga en viga de 4 puntos para valorar la flexibilidad.

### Módulo dinámico

En la prueba de módulo dinámico el asfalto sin modificar proporcionó a la mezcla la más baja rigidez mientras que los asfaltos modificados con polímero proporcionaron una mayor rigidez.

Con el asfalto prototipo desarrollado se obtuvo mayor rigidez que con el asfalto sin modificar y con los asfaltos modificados con polímero comúnmente usados. Un valor de módulo dinámico mayor a 8,000 MPa fue logrado.

### Fatiga

En la prueba de fatiga el asfalto sin modificar proporcionó a la mezcla la más baja flexibilidad mientras que los asfaltos modificados con polímero proporcionaron una mayor vida a fatiga.

A un nivel de deformación alta (700  $\mu\text{m}$ ), la mezcla con AC-20 presentó la falla cercana a las 20,000 repeticiones de carga, la mezcla con AC#005-16 a 30,000 repeticiones aprox., la mezcla con ACO-276-P A 70,000 de repeticiones y la mezcla con asfalto prototipo a 100,000 de repeticiones de carga.

A una deformación baja (400  $\mu\text{m}$ ), la mezcla con AC-20 presentó la falla cercana a las 400,000 repeticiones de carga, la mezcla con AC#005-16 a 8,000,000 repeticiones aprox., la mezcla con ACO-276-P A 2,000,000 de repeticiones y la mezcla con asfalto prototipo a 20,000,000 de repeticiones de carga.

El asfalto prototipo mostró los mejores resultados a baja y alta deformación, mientras que la mezcla con AC-20 tuvo el desempeño más deficiente en ambos casos.

En la mezcla con asfalto prototipo presentó los mejores resultados y el AC-20 los valores más bajos de FEL.

Los resultados mostraron que el asfalto con el más pobre desempeño en ambas pruebas fue el asfalto AC-20. El asfalto prototipo mostró la mejor resistencia demostrando buen comportamiento en ambas pruebas (módulo y fatiga).

## Bibliografía

(s.f.).

- Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres, A.C. (2011). *Proyecto estructural de pavimentos asfálticos*. Mexico: Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A. de C.V.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (2010). *Recomendacion AMAAC RA 04/2010*. México, D.F.: Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A. de C.V.
- Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (2011). *Recomendacion AMAAC RA 01/2011*. Mexico, D.F.: Grafica, Creatividad y Diseño S.A. de C.V.
- Asociación Mexicana del Asfalto, A. (2013). *Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013 DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS DE GRANULOMETRIA DENSA DE ALTO DESEMPEÑO*. D.F., Mexico: Asociación Mexicana de Asfalto, A.C.
- Cáceres Morales, C. A. (2007). *Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México; Tesis profesional presentada por Carlos Alejandro Cáceres Morales*. Cholula, Puebla, México : Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas Puebla.
- CINCIRE ROMERO, V., & HERNANDEZ FERNANDEZ , N. (s.f.). *PAVIMENTOS DE LARGA DURACION. CASO DE ESTUDIO: LIBRAMIENTO DR. GONZALES, N.L. MEXICO*. NUEVO LEON, MEXICO.
- Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. (2002). *M5.1. CATALOGO DE DETERIOROS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES*. Montreal : Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica.
- Diaz Conti, A. B. (s.f.). *Apuntes Vías Terrestres*. Publicaciones BUAP.
- Fonseca, A. M. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras Tomo I*. Bogota, Colombia: Universidad Catolica de Colombia, Ediciones y Publicaciones.
- Garnica Anguas , P., & Correa, A. (2004). *Conceptos Mecanicistas en pavimentos*. Sanfandilla, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcón Orta, H. A. (2004). *Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas*. Safandilla, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte IMT.
- Hernández , R., Garnica , P., & Solorio, R. (2011). Caracterización de los espectros de carga en la red carretera mexicana. *VII Congreso mexicano del asfalto* (pág. 8). Ciudad de Mexico: Asosiacion Mexicana del Asfalto A.C. .
- J. Garber, N., & A. Hoel, L. (2009). *Traffic & Highway Engineering* . Estados Unidos de America: Cengage Learning.
- MAXIL COYOPOTL, R., & SALINAS HÉRNANDEZ, M. A. (2006). *VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE POLIMEROS EN EL ASFALTO*. CHOLULA, PUEBLA, MEXICO: UDLAP.

SCT. (2005). *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES. PARTE 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS. TITULO: 05 MATERIALES ASFALTICOS, ADITIVOS Y MEZCLAS. CAPITULO 004 CALIDAD DE MATERIALES ASFALTICOS GRADO PG.* CIUDAD DE MEXICO: SCT.

SCT. (2006). *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES. PARTE 4 MATERIALES PARA PAVIMENTOS. TITULO 05. MATERIALES ASFALTICOS, ADITIVOS Y MEZCLAS CAPITULO 002. CALIDAD DE MATERIALES ASFALTICOS MODIFICADOS.* CIUDAD DE MEXICO: SCT.

SCT. (2006). *N.CMT.4.05.002/06 Libro: CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES PARTE 4; MATERIALES PARA PAVIMENTOS.* MEXICO: SCT.