



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

TEMA:

ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL RECICLADO DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LA RED CARRETERA DEL
ESTADO DE MICHOACÁN

PRESENTA:

JOSÉ RAFAEL BERNAL PADILLA

ASESOR:

Doctor en Ingeniería Civil

JORGE ALARCÓN IBARRA

MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DEL 2015



Contenido

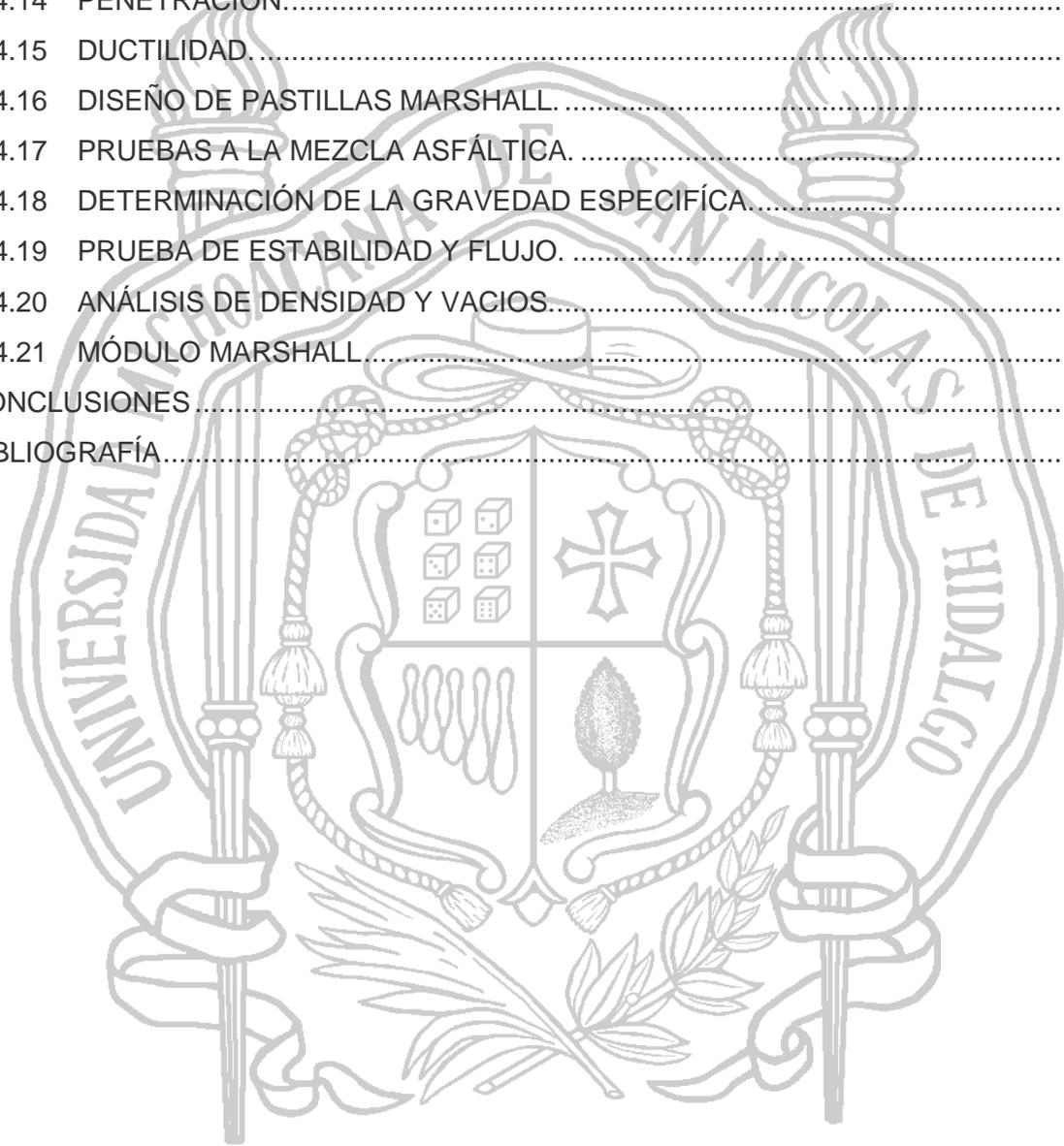
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Capítulo 1	10
1 LAS CARRETERAS EN MÉXICO.....	10
1.1 CAMINOS.....	11
1.1.1 Clasificación por transitabilidad	11
1.1.2 Clasificación administrativa.....	11
1.1.3 Clasificación técnica oficial	11
1.2 ETAPAS DE UNA CARRETERA	12
1.2.1 Planeación.....	12
1.2.2 Proyecto	12
1.2.3 Línea Definitiva.....	13
1.2.4 Curva Masa o Diagrama de Masas.....	13
1.3 INFRAESTRUCTURA CARRETERA.....	13
1.4 RED CARRETERA DEL ESTADO DE MICHOACÁN	20
Capítulo 2	23
2 PAVIMENTOS FLEXIBLES	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	24
2.2 PAVIMENTO FLEXIBLE	24
2.2.1 Resistencia Estructural	25
2.2.2 Durabilidad	25
2.2.3 Requerimientos de conservación.....	25
2.2.4 Comodidad	25
2.3 CARACTERÍSTICAS Y ESTRUCTURA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES ...	26
2.3.1 Base	26
2.3.2 Subbase	29
2.3.3 Terracerías	31
2.3.4 Cuerpo del terraplén.....	31
2.4 CARPETA ASFÁLTICA	32
2.4.1 Cemento asfáltico.....	32
2.4.2 Rebajados Asfálticos	32



2.4.3	Emulsiones asfálticas	32
2.4.4	Carpetas de concreto asfáltico.....	33
2.5	FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES	34
2.5.1	Falla por insuficiencia estructural.....	34
2.5.2	Falla por defectos constructivos.....	34
2.5.3	Falla por fatiga.....	34
2.5.4	Fallas comunes en los pavimentos	34
2.5.5	Agrietamiento en “Piel de cocodrilo”	35
2.5.6	Deformación permanente en la superficie del pavimento.....	35
2.5.7	Fallas por cortante.....	35
2.5.8	Agrietamiento longitudinal.....	35
2.5.9	Consolidación del terreno de cimentación	35
2.6	DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DE LAS CARRETERAS.....	35
3	RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	37
3.1	OBJETIVO DEL RECICLADO.....	38
3.2	ANTECEDENTES DEL RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	39
3.3	TIPOS DE RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	40
3.3.1	Reciclado in situ en caliente	41
3.3.2	Reciclado en caliente con planta dosificadora	41
3.3.3	Reciclado in situ en frio con cemento	41
3.3.4	Reciclado in situ en frio con emulsiones bituminosas	42
4	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	43
4.1	METODOLOGÍA DE DISEÑO MARSHALL.....	44
4.1.1	GRANULOMETRÍA	44
4.1.2	ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA.....	45
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT).....	47
4.3	MUESTREO DEL RAP	47
4.4	PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.....	49
4.5	PRUEBA DE PORCENTAJE DE ASFALTO.....	51
4.6	PRUEBA DE GRANULOMETRÍA AL MATERIAL SIN ASFALTO.....	52
4.7	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO DE APORTACIÓN.....	53
4.8	MUESTREO DEL AGREGADO PÉTREO.....	53



4.9	PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.....	55
4.10	PRUEBA DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO PÉTREO.	59
4.11	PRUEBA DE EQUIVALENTE DE ARENA.....	60
4.12	PRUEBA DE ÍNDICE PLÁSTICO.	61
4.13	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO DE APORTACIÓN.	61
4.14	PENETRACIÓN.....	62
4.15	DUCTILIDAD.....	62
4.16	DISEÑO DE PASTILLAS MARSHALL.....	63
4.17	PRUEBAS A LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	64
4.18	DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	65
4.19	PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO.....	70
4.20	ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACIOS.....	77
4.21	MÓDULO MARSHALL.....	77
CONCLUSIONES.....		83
BIBLIOGRAFÍA.....		86





RESUMEN

A lo largo de este trabajo de investigación se podrá observar una recopilación de antecedentes históricos, estadísticas y una serie de estudios realizados al material producto del fresado de una carpeta asfáltica (RAP), con lo que se pretende demostrar los grandes y múltiples beneficios que conlleva realizar dicho proceso en las carreteras mexicanas.

Los resultados obtenidos en este trabajo se basaron en pruebas experimentales tanto al material RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), como a los materiales de aportación como son, el asfalto virgen y el agregado pétreo, se podrá ver que el desempeño de la mezcla asfáltica con un porcentaje de RAP incluido, cumple con las características de calidad, durabilidad y serviciabilidad que ofrece una mezcla convencional, con lo cual se comprueba que este procedimiento es altamente beneficioso, ya que nos permite aumentar el aprovechamiento de los recursos económicos y naturales.

El diseño de las pastillas de prueba de las mezclas asfálticas se realizó bajo la metodología de diseño Marshall, ya que actualmente en México el diseño de pavimentos, en su mayoría optan por esta opción de diseño.

A lo largo de este proyecto de investigación se podrá observar cada una de las pruebas realizadas a los materiales antes mencionados y al final se podrán corroborar y comparar los resultados de los especímenes de mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de RAP incluido con respecto al de una mezcla asfáltica tradicional, es decir, sin RAP incluido.

PALABRAS CLAVE

RAP: Pavimento Asfáltico Recuperado.

Pavimento Asfáltico: Conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas generadas por el flujo de tránsito, con la capa de rodamiento formada por una mezclas asfáltica.

Metodología Marshall: El ensayo Marshall es un método ideado para dosificar las mezclas asfálticas empleando asfaltos sólidos y material granular que no supere un tamaño máximo de 2.54 cm (1"). Mediante la prueba, se obtiene la cantidad apropiada de asfalto para poder garantizar la suficiente estabilidad y así mismo las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones, un buen recubrimiento de partículas para obtener un pavimento durable incluyendo el factor de la compactación.



ABSTRACT

Throughout this research work can see a collection of historical background, statistics and a series of studies to the product of milling of asphalt (RAP) material which is intended to demonstrate the large and multiple benefits of perform this process on Mexican roads.

The results obtained in this study were based on experimental evidence both material RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) and filler materials such as the virgin asphalt and stone aggregate, you can see that the performance of the asphalt mix with RAP percentage included, meets the characteristics of quality, durability and serviceability provides conventional mixing, whereby it is found that this procedure is highly beneficial as it allows us to increase the use of economic and natural resources.

The design of the test pads asphalt mixtures was conducted under the Marshall design methodology, as currently in Mexico pavement design, most opt for this design option.

Throughout this research project will see each of the tests to the aforementioned materials and may eventually corroborate and compare the results of specimens of asphalt with different percentages of RAP including with respect to a mixture traditional asphalt, ie without RAP included.



INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transportes de un país influyen significativamente en el desarrollo y crecimiento anual de la economía, ya que la eficiencia de operación de ellos puede abatir considerablemente los gastos que personas y mercancías tienen por concepto de transportarse de un sitio a otro. Hay países que han desarrollado más un modo de transporte que otro en términos de la infraestructura, en México las carreteras constituyen uno de los modos de transportes del cual depende más el desarrollo y crecimiento económico del país. Contar con un buen sistema carretero en el país permitirá que la competitividad sea mayor.

Como es conocido, debido al uso de la infraestructura de un modo de transporte, éstas sufren desgastes o deterioro gradual e inevitable, que tarde o temprano acabará con su vida útil. Esto lleva a mantenimientos preventivos o periódicos para conservarlas en buenas condiciones y alargar su periodo de vida, obteniéndose menores costos de operación, menores impactos negativos en el medio ambiente y mayor rendimiento a la inversión que se hace en estos rubros.

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua de cargas vehiculares y de las condiciones meteorológicas. Tomando en cuenta estos dos factores, junto al envejecimiento natural de los materiales, hacen que el pavimento sufra un proceso de deterioro. Este envejecimiento y deterioro provocan que el pavimento tenga una disminución paulatina de sus niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobre pasar ciertos valores se hace necesaria una operación de conservación.

La conservación de la red carretera es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que en ella se movilizan. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas alternativas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, el reciclado de carpetas asfálticas, como medio de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad.

La creciente sensibilización social acerca de la importancia y necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado, sin embargo cabe señalar que a pesar de estos avances en las leyes aún hay mucho por hacer sobre todo en la ley de obras públicas, así como, darles una mayor motivación e incentivos a los constructores que lleven a cabo acciones como el reciclado de mezclas asfálticas. Dada la rigidización de las leyes, esto dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando de esta forma su costo y el de su transporte hasta la obra, ya que casi nunca se producen el lugar donde se necesitan. De igual forma, es creciente la dificultad para encontrar un lugar adecuado para verter los materiales retirados del pavimento a precio razonable. Este tipo de situaciones aumentan en espacios de ámbito urbano.



El desecho de los materiales envejecidos del pavimento, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que dicho material producto del fresado, pese a estar envejecido, conserva gran parte de sus cualidades, además de esto el proceso de fresado y reutilización de la mezcla asfáltica conlleva a un gran ahorro, ya que solo requiere de un 1% a 4.5% de asfalto virgen adicional, mientras que de no incorporar RAP, por sus siglas en inglés *reclaimed asphalt pavements* (pavimento asfáltico recuperado), se pueden llegar a necesitar más de un 6% de asfalto. Este aspecto, junto con el reducido costo de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético y económico sean importantes respecto a la construcción convencional de pavimentos asfálticos.

Actualmente el estado de Michoacán cuenta aproximadamente con una longitud en su red carretera de 9,000 kilómetros, de los cuales de forma aproximada un 95 % son pavimentos flexibles y a nivel nacional aproximadamente hay un 96% de pavimentos flexibles, es decir tienen una carpeta asfáltica, lamentablemente un gran porcentaje de estos caminos se encuentran según la clasificación de la SCT en estado no satisfactorio.

Como parte de las grandes carencias persistentes en el mejoramiento de las vías de comunicación terrestres en el estado de Michoacán se ha considerado la gran necesidad de la implementación de nuevos métodos de construcción y/o rehabilitación de los caminos, que nos permita optimizar tanto los recursos económicos como los naturales.

Considerando lo anterior, en este trabajo de investigación me permitiré abordar el tema del reciclado de mezclas asfálticas, dado que con esta técnica, que en los últimos años ha tomado un papel muy significativo en la rama de la industria de los asfaltos y por lo tanto en los caminos, lograremos sin duda alguna abatir de manera importante el impacto ecológico nocivo generado por el desperdicio producto del fresado de la carpeta asfáltica y de igual forma la disminución de los costos de construcción y/o rehabilitación de las carreteras.

Para este proyecto de investigación se obtuvieron muestras representativas de material RAP del tramo carretero Zacápu-Carapan, el cual fue sometido a una necesaria rehabilitación y donde se pretende demostrar que la implementación de un porcentaje de rap es altamente beneficioso y sobre todo viable.

La viabilidad de los proyectos es un aspecto muy importante, en este caso del reciclado de mezclas asfálticas este punto se demostrará que es fehaciente, ya que, mediante la realización de las pruebas realizadas a los materiales se puede observar un ahorro económico y una disminución en el uso de materiales vírgenes de forma sustancial al llevar a cabo este proceso que en México se podría catalogar como innovador.

La ideología del mexicano como tal sería, quizás, el mayor reto con el que se podría enfrentar esta metodología de diseño, por lo cual se pretende mediante estudios como este el demostrar a las personas del ramo de la industria de construcción de vías



terrestres los múltiples beneficios que brinda el llevar a cabo de forma correcta este proceso constructivo en los pavimentos flexibles.

Actualmente en México todo el producto RAP, o por lo menos gran parte de este, se ha estado desperdiciando de una manera exagerada, dentro de los motivos de este hecho, se podrían mencionar una gran cantidad, sin embargo los principales son sin duda alguna, la falta de conocimientos técnicos en el tema y la renuencia al cambio de técnicas de construcción o de diseño de pavimentos asfálticos.

Dada esta situación es de gran importancia la investigación de esta tecnología y demostrar los beneficios y la importancia que tiene el llevar a cabo proyectos con mezclas recicladas, con estudios debidamente fundamentados se pretende minimizar los aspectos mencionados en el párrafo anterior.





Capítulo 1

1 LAS CARRETERAS EN MÉXICO.

Las carreteras en todos los países juegan un papel de importancia incalculable y para México no es la excepción, debido a que por ellas se mueven cantidades importantes tanto de mercancías, como de pasajeros y de esas situaciones se deriva un flujo comercial que permite el desarrollo de economías.

Las carreteras representan una infraestructura de ingeniería civil que nos permite desplazarnos de un lugar a otro con la ayuda de vehículos, cuyos servicios primordiales son el brindar seguridad, confort y rapidez.

Los caminos a lo largo de su historia, han tenido muchos cambios con el fin de lograr sus objetivos esenciales antes mencionados, debido primordialmente a una mayor demanda de usuarios a estas obras ingenieriles ocasionados por una explosión demográfica y de un desarrollo económico necesario para el lograr satisfacer la necesidades primordiales de la sociedad.

Los caminos se pueden clasificar de acuerdo a su transitabilidad, a su administración y a la clasificación técnica oficial.



1.1 CAMINOS

De acuerdo con el ingeniero Carlos Crespo, un camino es la adaptación de una faja sobre la superficie terrestre que cumple con condiciones de ancho, alineamiento y pendiente para permitir el rodamiento de vehículos. Los caminos se clasifican por su transitabilidad, por su aspecto administrativo y la clasificación técnica oficial.

1.1.1 Clasificación por transitabilidad

La clasificación por transitabilidad se debe a las etapas de construcción del camino y estas pueden ser:

- Camino en terracerías. Se construye hasta nivel de subrasante.
- Camino revestido. Sobre la subrasante se han colocado una o varias capas de material granular.
- Camino pavimentado. Sobre la subrasante se ha construido el pavimento.

1.1.2 Clasificación administrativa

Este tipo de clasificación se debe al aspecto administrativo de los caminos y estos son:

- Caminos federales. Costeados y a cargo de la federación.
- Caminos Estatales. Cooperación 50% por el estado donde se construyen y 50% por la federación. Quedan a cargo de la Juntas Locales de Caminos.
- Caminos vecinales. Una tercera parte lo pagan los vecinos, otra tercera parte la federación y el tercero restante el estado.
- Caminos de Cuota. Quedan a cargo de la dependencia oficial descentralizada llamada Caminos y Puentes Federales, siendo la inversión recuperable.

1.1.3 Clasificación técnica oficial

De acuerdo con el ingeniero Carlos Crespo, este tipo de clasificación permite distinguir las condiciones físicas del camino, ya que lo que se toma en cuenta son los volúmenes de tránsito al final del periodo económico del camino (15 años).

- Tipo Especial. Tránsito diario promedio anual (TDPA) superior a 3,000 vehículos.
- Tipo A. Tránsito diario promedio anual (TDPA) de 1,500 a 3,000 vehículos.
- Tipo B. Tránsito diario promedio anual (TDPA) de 500 a 1,500 vehículos.
- Tipo C. Tránsito diario promedio anual (TDPA) de 50 a 500 vehículos.

La capacidad práctica de trabajo de un camino es el volumen máximo que alcanza antes de congestionarse o antes de perder la velocidad estipulada. La capacidad de una carretera se mide en vehículos por hora o por carril. Las capacidades prácticas son en condiciones ideales, en cuanto a sección, alineamiento y visibilidad. La capacidad de una carretera se ve afectada por el ancho de la sección, la visibilidad, la pendiente, el ancho de los acotamientos y el porcentaje de vehículos pesados en la vía.



1.2 ETAPAS DE UNA CARRETERA

Para poder analizar una carretera y conocer sus características, es necesario separarlas en etapas como los son: planeación, proyecto y construcción (Ing. Carlos Crespo).

1.2.1 Planeación

En la planeación, se buscan los factores geográfico - físicos, económico - sociales y políticos que caracterizan a la región. El estudio socio - económico busca valorar las características de la población, el aprovechamiento de los recursos naturales, rendimiento de actividades y niveles de consumo. En lo que se refiere a la población se busca su crecimiento y distribución.

1.2.2 Proyecto

A partir de los datos de la planeación, se hace el proyecto en base a estudios topográficos, estudio de mecánica de suelos y estudio de estructuras.

Trazo preliminar

Se lleva a cabo el reconocimiento y se fijan puntos obligados para hacer el trazo preliminar. Es una poligonal abierta donde se clavan estacas a cada 20 metros. Este sirve de base para el trazo definitivo y para un presupuesto preliminar. El procedimiento es el siguiente (Ing. Carlos Crespo):

- Marcar el punto de partida.
- Establecer el azimut en el punto de partida.
- Determinar la cota del punto de partida.
- Establecer el kilometraje.
- Tomar las siguientes precauciones
 - En la línea preliminar no se deben forzar grandes tangentes.
 - Se colocan estacas cada 20 m y en puntos accidentados.
 - No se debe perder tiempo colocando las estacas con exactitud.
 - Evitar dañar sembradíos y frutales.
 - Hacer una doble lectura en los ángulos del P.I. anotar el ángulo simple y el ángulo doble en la libreta.
 - Hacer observaciones solares a cada 10 km.
- Hacer buenas notas de campo.
- Efectuar la nivelación del perfil de la línea preliminar.
- Vaciar todos los datos de campo en un plano.



1.2.3 Línea Definitiva

Un vez que se tiene la línea preliminar, es necesario proyectar la línea definitiva que después será trazada en el terreno. Se calcula la abertura del compás para que al pasar entre dos curvas de nivel no exceda la pendiente deseada. Al brincar de una curva de nivel a otra y unir los puntos se forma una línea llamada: "Línea a pelo de tierra". Esta línea es la base con las mayores tangentes posibles deberá apegarse a la línea a pelo de tierra. Para lograr esto, la línea definitiva debe compensar tanto a la izquierda como a la derecha la línea a pelo de tierra.

La subrasante es el perfil del camino compuesto por las líneas rectas, que son las pendientes que están unidas por arcos de curvas verticales. Esta debe compensar en la medida que sea posible los cortes y los terraplenes en el sentido longitudinal. Existen dos tipos de curvas verticales: las de cima en las cuales se sube y luego se baja y las de columpio donde se baja y luego se sube.

* *PC punto en donde comienza la curva circular simple*

** *PI punto de intersección de la prolongación de las tangentes*

****PT punto en donde termina la curva circular simple*

1.2.4 Curva Masa o Diagrama de Masas

Es importante ajustar el diseño de un camino a las especificaciones sobre pendientes y curvas. Para economizar, es importante el movimiento de tierras, (excavar y rellenar solamente lo indispensable) y acarrear a la menor distancia. Este estudio de excavación, relleno, compensación y movimiento se ve en el diagrama de masas. En el cual, las ordenadas representan volúmenes acumulativos de terracerías y las abscisas el cadenamiento correspondiente.

Para determinar los volúmenes acumulados se deben considerar los cortes como positivos y los terraplenes como negativos y al realizar la suma, se obtiene el volumen.

Para realizar el diagrama, se recomienda no tomar longitudes mayores a 500 m. teniendo como límite 1 km. Los objetivos de la curva masa son compensar volumen, fijar el sentido de los movimientos del material, calcular los sobre - acarreos y controlar los préstamos y desperdicios (Ing. Carlos Crespo).

1.3 INFRAESTRUCTURA CARRETERA

La red carretera nacional, que se ha desarrollado de forma gradual a lo largo de varias décadas, comunica a casi todas las regiones y comunidades del país a través de más de 333 mil kilómetros de caminos de todos tipos. Por su importancia y características, la red carretera mexicana se clasifica en red federal, redes estatales, caminos rurales y brechas mejoradas.

La red federal de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. Registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga entre ciudades y canaliza los



recorridos de largo itinerario, los relacionados con el comercio exterior y los producidos por los sectores más dinámicos de la economía nacional. Las redes estatales cumplen una función de gran relevancia para la comunicación regional, ya que permiten enlazar las zonas de producción agrícola, ganadera, etcétera, para asegurar la integración de extensas áreas en diversas regiones del país. Por su parte, los caminos rurales y las brechas mejoradas son vías modestas y en general no pavimentadas; su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas. Sin embargo su efecto en las actividades y la calidad de vida de esas mismas comunidades es de gran importancia.

Si bien la red carretera posee una importancia de primer orden para nuestro país, que se destaca a nivel mundial por su vocación caminera, tanto a su vastedad territorial nacional como las limitaciones presupuestales a las que ha estado sujeto el país y otros factores, inciden en una u otra medida, al hecho de que México posea una densidad carretera (es decir una longitud de carreteras por kilómetro cuadrado de territorio) relativamente baja, como se muestra en la figura 1.1.

TABLA 1.1 Comparativa de la Densidad Carretera Internacional

COMPARATIVO INTERNACIONAL DE DENSIDAD CARRETERA (km de carreteras por km ² de territorio)							
MÉXICO	EU	CANADA	FRANCIA	ALEMANIA	ITALIA	JAPON	REINO UNIDO
0.14	0.64	0.10	1.62	1.77	1.04	3.04	1.61

Fuente: The World Competitiveness Yearbook 2000

En México, entre 1995 y 2000 se construyeron o modernizaron 10 mil 371.7 kilómetros, de los cuales 6 mil 521.8 fueron carreteras pavimentadas y 3 mil 849.9, caminos rurales. En la fig. 1.2, se presentan los pormenores de esas actividades, que consistieron en atender la construcción y modernización de tramos carreteros de todos tipos.

TABLA 1.2 Estadística de Construcción y Rehabilitación de los tramos Carreteros

RESULTADOS 1995-2000	
TRABAJO	LONGITUD (km)
Carreteras Federales	
Construcción y Modernización	6,521.80
Conservación de Carreteras	
Reconstrucción de tramos	5,819.80
Reconstrucción de puentes (unidades)	790.00
Conservación periódica	28,419.20
Conservación rutinaria	41,865.80



Atención a puntos conflictivos	928.00
Caminos Rurales	
Construcción y modernización	3,849.90
Reconstrucción	32,981.50
Conservación	27,561.80
Programa de Empleo Temporal (anual)	68,800.00
Fuente: SCT, Subsecretaría de Infraestructura	

Para finales del año 2000, la red carretera nacional tenía una longitud total de 333 mil 247.1 kilómetros, de los que 106 mil 571.5 corresponden a carreteras libres, 5 mil 933.1 a autopistas de cuota, 160 mil 185.1 a caminos rurales y alimentadores y 60 mil 557.4 a brechas. Mientras que para finales del 2014 la longitud de la red carretera nacional se estima en 453, 386 kilómetros.

De las carreteras libres, 41 865.8 kilómetros pertenecen a la red federal, mientras que 64 mil 705.7 están distribuidos entre las 31 redes estatales. Por lo que se refiere a autopistas de cuota, la red operada por Capufe, integrada por su red propia y la que opera por cuenta de terceros -incluida la red del Fideicomiso de Apoyo para el Rescate de Autopistas Concesionadas- (FARAC), tiene una longitud de 4 mil 714.7 kilómetros, las concesionadas a particulares cuentan con 786 kilómetros y 432.4 son concesiones estatales de cuota.

Los caminos rurales en su gran mayoría se han transferido a los gobiernos de los estados, por lo que la SCT sólo mantiene la jurisdicción directa de 4 mil 596.9 kilómetros. El total de caminos rurales a cargo de los estados suma 108 mil 530.2 kilómetros, mientras que el total que es responsabilidad de los municipios y otras dependencias es de 47 mil 58 kilómetros. Las brechas se reparten en todo el país y suman 60 mil 557.4 kilómetros.

TABLA 1.3 Longitud de la Red Carretera Nacional

LONGITUD DE LA RED CARRETERA EN 2000	
CARACTERÍSTICAS	LONGITUD
RED FEDERAL	47,366.50
Cuota	5,500.70
Libre	41,865.80
Redes estatales	65,138.10
Cuota	432.40
Libre	64,705.70
Red de caminos rurales	160,185.10
SCT	4,596.90
Estados	108,530.20



Otros	47,058.00
Brechas mejoradas	60,557.40
TOTAL	333,247.10

Fuente: SCT, Subsecretaría de Infraestructura

Del total de kilómetros en servicio, 107 mil 822.4 están pavimentados, 145 mil 350 corresponden a carreteras revestidas, 19 mil 517.3 son de terracerías y 60 mil 557.4 son brechas. Entre los caminos pavimentados, una longitud de 9 mil 872.6 kilómetros (9.2 por ciento del total) tiene cuatro o más carriles.

Los principales aspectos de la problemática de la red federal de carreteras son el deficiente estado físico en que se encuentra, las limitaciones geométricas y de capacidad de una longitud importante de los corredores que constituyen sus tramos más utilizados, la todavía insuficiente cobertura, el mal estado de los caminos rurales y la necesidad de consolidar el funcionamiento del sistema nacional de autopistas de cuota, tanto a lo que se refiere a sus aspectos financieros como a cuestiones operativas y de conservación.

En la actualidad y como lo muestra la figura 1.4, las condiciones físicas en que se encuentra la red federal de carreteras se clasifican de esta manera:

- 25%, buenas.
- 35%, regulares.
- 40%, malas.

La atención que le proporciona la Secretaría consiste en desarrollar programas de conservación rutinaria para asegurar buenas condiciones de servicio al público, de conservación preventiva, para evitar de esta forma mayores deterioros, y de reconstrucción, para recuperar tramos que llegaron a presentar daños importantes en el pasado.

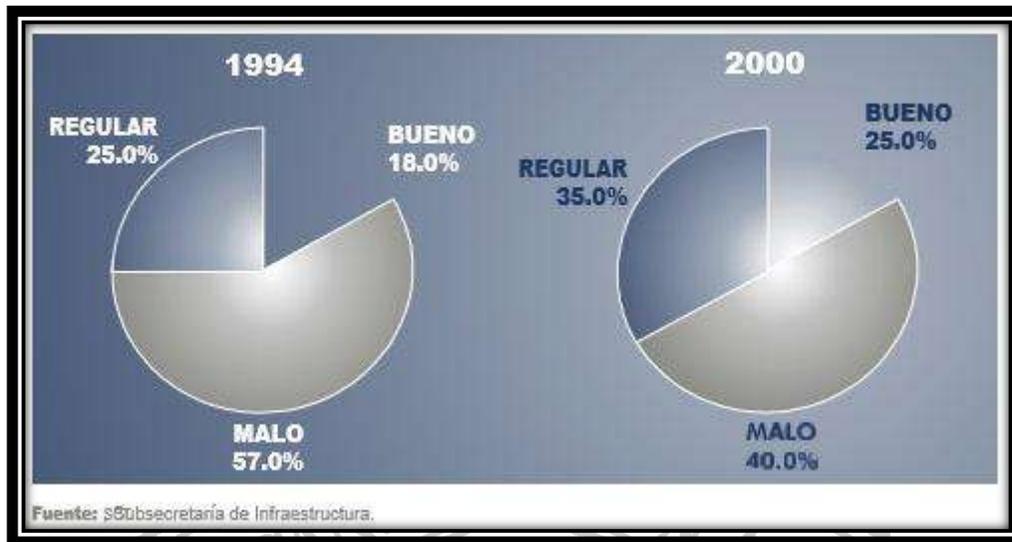


FIG. 1.4 Estado Físico de las Carreteras Nacionales

Sin embargo, e independientemente del esfuerzo que se realiza, los montos de inversión que históricamente se han canalizado a la conservación de carreteras no resultan suficientes para superar todos los rezagos y lograr que la red federal no tenga caminos en mal estado.

Dados los volúmenes de tránsito que utilizan esa red y las especificaciones con las que cuenta, se observa que, en promedio, el 60% de su longitud funciona en condiciones que oscilan entre buenas y óptimas. Por su parte, un 30% presenta condiciones regulares en términos de capacidad, y alrededor del 10% opera cerca de la saturación. En esos tramos se presentan problemas de congestión, y los costos de operación de los vehículos resultan más elevados que en el resto.

Uno de los elementos más importantes de la red carretera nacional lo constituyen los 14 corredores que conectan las 5 mesorregiones con que cuenta el país y que proporcionan acceso y comunicación permanente a las principales ciudades, fronteras y puertos marítimos.

La longitud de estos corredores, que atienden a poco más del 54% de los flujos carreteros interregionales y cuya configuración se presenta en la figura 1.5, es de 19 mil 263 kilómetros.



FIG. 1.5 Mapa de los Corredores Carreteros Nacionales (FUENTE: SCT)

Por lo que se refiere a autopistas de cuota, México cuenta con uno de los sistemas más extensos del mundo con una longitud total de 5 mil 933.1 kilómetros e integrado por 74 autopistas y 48 puentes.

TABLA 1.6 Sistema de Autopistas de Cuota

SISTEMA DE AUTOPISTAS DE CUOTA			
RED	AUTOPISTAS	PUENTES	LONGITUD
Capufe y Banobras ¹	47	39	4,714.70
Concesionadas a particulares y gobiernos estatales	27	9	1,218.40
TOTAL	74	48	5,933.10

¹ Incluida la red FARAC
Fuente: SCT, Subsecretaría de infraestructura

La red a cargo de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (Capufe) está compuesta por vías construidas por el estado que fueron entregadas a ese organismo para su administración y explotación. En general se trata de carreteras maduras con altos niveles de aforo e ingreso.



La red FARAC está integrada por las vías rescatadas en 1997, más las que han entregado en operación a partir de 1998. Se trata de carreteras nuevas concesionadas a Banobras, institución nacional de crédito, cuyos flujos de vehículos e ingresos no han alcanzado todavía una madurez plena.

La red concesionada se forma por autopistas construidas entre 1989 y 1994 que fueron concesionadas a particulares, gobiernos estatales e instituciones financieras. También se trata de vías relativamente nuevas con niveles de aforo e ingreso variables, pues hay algunas maduras y otras que no lo son tanto.

En cuanto a su administración, presupuesto y operación, las tres redes son diferentes, como se observa en la figura 1.7.

TABLA 1.7 Características de las Autopistas de Cuota

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS AUTOPISTAS DE CUOTA EN OPERACIÓN			
CARACTERÍSTICA	CAPUFE	FARAC	CONCESIONADAS
RED	Autopistas construidas por el Estado y entregadas a Capufe para su administración y explotación.	Autopistas rescatadas en 1997 y las que ha puesto en operación a partir de 1998.	Autopistas construidas sobre todo entre 1989 y 1994; están concesionadas a particulares, gobiernos estatales o instituciones financieras.
Autopistas predominantes	Maduras, con altos niveles de ingresos.	Nuevas, construidas entre 1989 y 1994; en proceso de maduración.	Relativamente nuevas, con excepción de concesiones otorgadas para lograr objetivos financieros.
Propiedad	Patrimonio nacional.	Patrimonio nacional. Concesionadas a Banobras, institución fiduciaria, que contrata a Capufe para operar y administrar.	Patrimonio nacional. Concesionadas a terceros para pago de créditos y recuperación de inversiones.
Tarifas	Autorizadas por SHCP.	Autorizadas por el Comité Técnico del FARAC.	Autorizadas por SCT bajo reglas específicas.
Presupuesto	Autorizado por el H. Congreso de la Unión y controlado por la SHCP.	Autorizado por el Comité Técnico del FARAC.	Autorizado por el Comité Técnico de cada fideicomiso de administración de la concesión.
Decisiones	Consejo de Administración	de Comité Técnico del FARAC.	Comité Técnico de Fideicomisos de



Capufe.

Administración.

Fuente: SCT, Subsecretaría de Infraestructura.

En materia de caminos rurales, el país cuenta con una red de 160 mil 185.1 kilómetros y comunica a 19 mil comunidades en las que habitan 14 millones de personas, es decir, el 60 % de la población rural nacional. Esta red está compuesta por caminos de bajas especificaciones, que son transitables en toda época del año y desempeñan un papel fundamental en la comunicación e integración permanentes de las comunidades a las que sirven.

En la actualidad, el estado físico de la red de caminos rurales es bueno en el 11% de su longitud, regular en el 27% y malo en el 62%. La vulnerabilidad de los caminos rurales ante eventos climáticos adversos y la baja inversión anual que se les canaliza genera altos costos de mantenimiento. De los programas vigentes durante el periodo 1995-2000 para su atención, el de Empleo Temporal, orientado al mantenimiento rutinario de los caminos, presentó un importante efecto social en regiones marginales y fue decisivo para su conservación.

1.4 RED CARRETERA DEL ESTADO DE MICHOACÁN

De acuerdo con la información publicada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el anuario 2012, la red carretera del estado de Michoacán cuenta con una longitud total de 15 468 kilómetros, conformados por caminos pavimentados, revestidos, terracerías y brechas.

De los cuales en su mayoría se encuentran en estado físico no satisfactorio, esta información se encuentra detallada en el Anexo 1 de este documento.

A nivel nacional, la gran mayoría de los pavimentos que conforman la red carretera son pavimentos asfálticos, en Michoacán la situación no es diferente, ya que presenta un alto porcentaje de este tipo de pavimentos que requieren una importante cantidad de acciones de conservación y en ciertos casos se llega a la reconstrucción de los mismos.

TABLA 1.9 Longitud y Características de la Red Carretera por Entidad Federativa según Superficie de Rodamiento (kilómetros)



Entidad Federativa	Total	Pavimentada				Revestida	Terracería	Brechas mejoradas
		Subtotal	Cuatro o más carriles	Dos carriles				
Estados Unidos Mexicanos	377 660	146 221	14 499	131 722	145 576	11 266	74 597	
Aguascalientes	2 325	1 288	148	1 140	704	0	333	
Baja California	11 749	2 825	395	2 430	4 178	462	4 284	
Baja California Sur	5 724	2 185	185	2 000	1 745	738	1 056	
Campeche	5 553	3 716	57	3 659	380	849	608	
Coahuila de Zaragoza	8 486	4 788	805	3 983	3 698	0	0	
Colima	2 209	1 192	183	1 009	792	84	141	
Chiapas	22 976	6 781	306	6 475	15 125	1 011	59	
Chihuahua	13 272	5 448	1 679	3 769	6 761	1 063	0	
Distrito Federal	149	149	70	79	0	0	0	
Durango	15 559	5 119	439	4 680	8 098	1 418	924	
Guanajuato	12 785	6 427	541	5 886	4 977	0	1 381	
Guerrero	18 612	6 100	316	5 784	6 432	0	6 080	
Hidalgo	11 573	4 184	532	3 652	5 935	180	1 274	
Jalisco	27 895	7 196	851	6 345	6 358	185	14 156	
México	13 326	6 542	647	5 895	6 784	0	0	
Michoacán de Ocampo	15 468	6 970	436	6 534	4 498	0	4 000	
Morelos	2 862	1 688	322	1 366	265	0	909	
Nayarit	9 309	3 239	263	2 976	2 739	0	3 331	
Nuevo León	7 333	4 778	772	4 006	2 522	6	27	
Oaxaca	22 572	7 227	152	7 075	12 918	0	2 427	
Puebla	10 127	5 517	225	5 292	4 405	0	205	
Querétaro de Arteaga	3 295	1 897	228	1 669	1 398	0	0	
Quintana Roo	5 443	2 939	300	2 639	2 504	0	0	
San Luis Potosí	11 580	5 415	405	5 010	6 061	104	0	
Sinaloa	16 951	5 086	779	4 307	2 980	3 325	5 560	
Sonora	25 161	7 273	833	6 440	4 412	0	13 476	
Tabasco	8 653	4 315	259	4 056	3 788	550	0	
Tamaulipas	13 986	5 144	306	4 838	8 680	162	0	
Tlaxcala	2 769	1 668	247	1 421	1 101	0	0	
Veracruz de Ignacio de la Llave	25 887	7 449	783	6 666	7 855	1 129	9 454	
Yucatán	12 112	5 982	404	5 578	2 511	0	3 619	
Zacatecas	11 959	5 694	631	5 063	4 972	0	1 293	

FUENTE: SCT, Subsecretaría de Infraestructura.

FIG. 1.9 Mapa de la Red Carretera del Estado de Michoacán



Capítulo 2

2 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Las carreteras y caminos son aquellas obras ingenieriles que nos permiten desplazarnos de forma rápida, segura y confortable.

En la actualidad existen dos tipos básicos de pavimentos, los cuales se clasifican de acuerdo al tipo de capa de rodadura, siendo así, están los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles. Los rígidos, construidos mediante la utilización de concreto hidráulico y los flexibles con la implementación de material asfáltico.

Actualmente en México, la mayoría de las carreteras están construidas con pavimentos flexibles, por lo cual es de suma importancia conocer sus características físicas y mecánicas para observar su comportamiento.

En este capítulo se podrán observar las principales componentes y características de los pavimentos flexibles.



2.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas generadas por el flujo de tránsito, es decir, de los vehículos que las transmiten a los estratos o capas inferiores en forma proporcional, obteniendo una superficie de rodamiento formada por una capa o franja. Dependiendo del tipo de pavimento, puede ser de asfalto o de concreto hidráulico, el cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado desempeño son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las capas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas y críticas. Así mismo, deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos presentes por las cargas vehiculares, de la intemperie y del agua, también debe tener color y textura apropiados.

Pasando a las funciones que tienen los pavimentos además de proporcionar una superficie de rodamiento, otra muy importantes la estructural, la cual consiste en recibir y distribuir las cargas y disipar los esfuerzos transmitidos por los vehículos. Por este motivo es muy importante estudiar perfectamente el tipo de material que se va a utilizar, los de mayor capacidad de carga se colocaran en las capas superiores ya que los esfuerzos se van disipando conforme a la profundidad, los materiales de menor capacidad se colocaran en las capas inferiores.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa, el objetivo es darle el espesor mínimo requerido para un adecuado comportamiento y que permita además reducir los esfuerzos sobre la capa inferior inmediata. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, sino que también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo la compactación y la humedad dos factores muy importantes, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

2.2 PAVIMENTO FLEXIBLE

Se entiende por pavimento flexible aquel que está compuesto por un capa o carpeta asfáltica, es decir, el pavimento flexible utiliza una mezcla de agregado grueso o fino con material bituminoso obtenido del asfalto o del petróleo. Esta mezcla es compacta, pero lo bastante plásticas para absorber grandes golpes y soportar un elevado volumen de tránsito.

El pavimento flexible resulta más económico en sus construcción inicial en comparación al pavimento rígido y tiene una vida útil, si es construido de forma adecuada, de entre 10 y 15 años, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil.

los pavimentos flexibles están constituidos principalmente por una carpeta asfáltica y además por una base, subbase y terracería.



Rico y Del Castillo (1984) citan que sobre la capa subrasante se construye el pavimento flexible, que está compuesto por sub - base, base y carpeta asfáltica. El pavimento flexible debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito. Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

- Resistencia estructural.
- Deformabilidad.
- Durabilidad.
- Costo.
- Requerimientos de conservación.
- Comodidad.

2.2.1 Resistencia Estructural

Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura (Rico y Del Castillo 1984).

2.2.2 Durabilidad

La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino, depende de la importancia de éste. Hay veces que es más fácil hacer reconstrucciones para no tener que gastar tanto en el costo inicial de un pavimento.

2.2.3 Requerimientos de conservación

Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro. Se debe de tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetida es otro aspecto que no se puede dejar de lado. La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.

2.2.4 Comodidad

Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto. La seguridad es muy importante al igual que la estética.



2.3 CARACTERÍSTICAS Y ESTRUCTURA DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

Como ya se mencionó, los pavimentos flexibles se identifican por tener una carpeta asfáltica que más adelante se detallará adecuadamente para su fácil comprensión. A continuación se describen las partes que integran un pavimento flexible como la base, subbase y terracería.

Las bases y subbases son capas de material pétreo adecuadamente seleccionadas para traspasar las cargas de la carpeta de rodadura a la subrasante (infraestructura). Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, la ubicación de estos materiales dentro de la estructura de un pavimento (superestructura), está dada por las propiedades mecánicas de cada una de ellas.

2.3.1 Base

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento. Regularmente ésta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además transmitir las de forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante en una base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales. En el caso de la granulometría, no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas, siendo de mayor importancia que el material tenga un VRS (valor relativo de soporte) alto y una plasticidad mínima; además se recomienda no compactar materiales en las bases que tengan una humedad igual o mayor que su límite plástico.

Dadas las condiciones a las que estará sujeta esta capa del pavimento, los materiales que la compondrán deberán contar con las siguientes condiciones de calidad estipuladas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

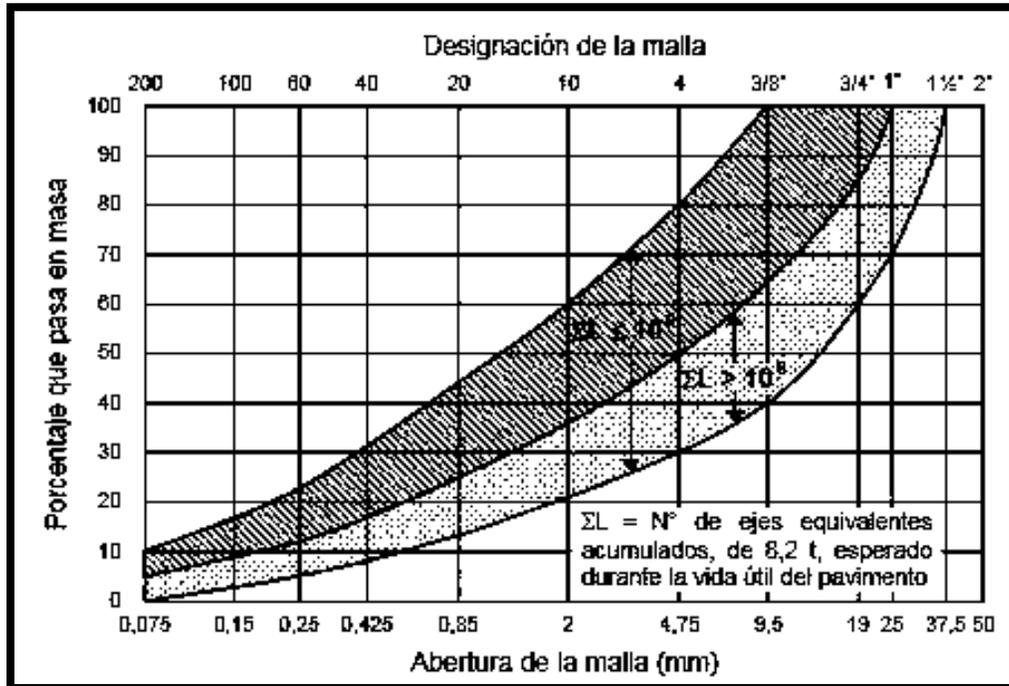


FIG. 2.1 Zonas granulométricas para los materiales empleados para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa. Fuente: SCT, N-CMT-4-02-002/04

Tabla. 2.2 Requisitos de Calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos. . Fuente: SCT, N-CMT-4-02-002/04

Características	Valor	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido [2], máximo	25	25
Índice plástico [2], máximo	6	6
Equivalente de arena [2], mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR) [2,3], mínimo	80	100
Desgaste de los Ángeles [2], máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas [2], máximo	40	35
Grado de compactación [2,4], mínimo	100	100

[1] ΣL =Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 ton, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante los procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que señalan en la Cláusula C. de la N-CTM-4-02-002/4.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASTHO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.



Con anterioridad a la construcción de la base, deberá limpiarse y retirarse toda sustancia extraña a la subbase o subrasante previamente aceptada. Los baches o puntos blandos deformables que se presenten en su superficie o cualesquiera área que tenga una compactación inadecuada o cualquier desviación de la superficie, deberán corregirse. La construcción de la base deberá ajustarse a los perfiles longitudinales y transversales del proyecto y cubriendo un ancho mayor al de la calzada de al menos 10 m a ambos costados. Se depositarán y se esparcirán los materiales por cordones, en una capa uniforme sin segregación de tamaños, de manera que la capa tenga el espesor requerido al ser compactada. No se permitirá el acarreo por sobre la base no compactada. El material de base agregado, que haya sido procesado en una planta o haya sido mezclado o combinado in situ, deberá tenderse en una capa uniforme con la profundidad y ancho indicados en los planos del proyecto.

El esparcido se realiza mediante una moto niveladora, esparcidor mecánico u otro método aprobado. Durante el tendido, deberá cuidarse de evitar cortes en la capa subyacente. La operación deberá continuar hasta que el material haya alcanzado por lo menos un 95% de la densidad máxima seca por el ensaye del Proctor Modificado. Ningún material deberá colocarse en nieve o en una capa blanda, barrosa o helada.

Después que el agregado haya sido esparcido, se le deberá compactar por medio de rodillado y riego. La compactación deberá avanzar gradualmente desde los costado hacia el centro de la vía en construcción. El rodillado deberá continuar hasta lograr la densidad especificada y hasta que no sea visible el deslizamiento del material delante del compactador. La distribución y el rodillado continuarán alternadamente tal como se requiere para lograr una base lisa, pareja y uniformemente compactada. No se deberá compactar cuando la capa subyacente se encuentre blanda o dúctil, o cuando la compactación cause ondulaciones en la capa de la base.

Una vez compactado el material se procederá a controlar la compactación por medio de la toma de densidades in situ de acuerdo a la norma T 147 de AASHTO. Los controles mínimos son ensayo de granulometría, capacidad de soporte (CBR), límites de Atterberg y AASHTO modificada.

Cualquiera área de la base terminada cuyo espesor compactado sea inferior al indicado o tenga ondas o irregularidades que excedan de 1 cm, deberán corregirse mediante escarificación de la superficie, perfilando, recompactando la respectiva área. La superficie de la base terminada, no deberá tener ningún punto cuya cota varíe en más de 1.5 cm sobre o bajo los niveles establecidos en los planos. Los espesores no podrán ser inferiores al 5% del espesor especificado.

La construcción de la base deberá suspenderse cuando las condiciones meteorológicas afecten en forma perjudicial la calidad de la capa terminada y no deberá ser colocada cuando la temperatura ambiente en descenso alcance a 3°C.



2.3.2 Subbase

Es la capa granular localizada entre la subrasante y la base en pavimentos flexibles o rígido, y ocasionalmente, sobre todo en pavimentos rígidos, se puede prescindir de ella.

Función de la subbase

- Cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de subbase (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar así que el pavimento sea absorbido por la subrasante. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías.
- También deberá prevenir la intrusión de los finos del suelo de la subrasante en las capas de base, para lo cual se debe especificar materiales de graduación relativamente densa para este propósito.
- Minimizar los daños por efecto de las heladas y en estos casos se debe especificar materiales con alto porcentaje de vacíos.
- Ayuda a prevenir la acumulación de agua libre dentro de la estructura del pavimento. En este caso se debe especificar material de libre drenaje y colectores para evacuar el agua.
- Proveer una plataforma de trabajo para los equipos de construcción.
- Dar soporte a las capas estructurales siguientes.

Los materiales para subbase y base estarán sujetos a los tratamientos mecánicos que lleguen a requerir con las especificaciones adecuadas, siendo los más usuales: la eliminación de desperdicios, el disgregado, el cribado, la trituración y en algunas ocasiones el lavado, los podemos encontrar en causes de arroyos de tipo torrencial, en las partes cercanas al nacimiento de un río y en los lugares o montañas constituidos por rocas andesíticas, basálticas y calizas. Es de gran importancia conocer estos tipos de terrenos ya que en base a esto se elige el tipo de maquinaria y el personal para trabajar en forma adecuada. El material que se manda del banco para efectuar el análisis correspondiente, deberá traer las etiquetas adecuadas y al llegar al laboratorio se le efectuará un secado, su disgregación y se le cuarteará. En pavimentos se realizan básicamente 3 tipos de ensayos que serán para clasificar el suelo, para controlar la obra y para proyectar el espesor y los porcentajes óptimos de aglutinante de las diferentes capas.

Se podrá usar partículas limpias, con suelos tipo grava arenosa, arenas arcillosas o suelos similares, que cumplan los siguientes requisitos:

- Inorgánicos.
- Libres de material vegetal.
- Libres de escombros.
- Libres de basuras.
- Libres de material congelado.
- Sin presencia de terrones.



- Sin presencia de trozos desagradables.

Además se debe cumplir las siguientes características estipuladas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

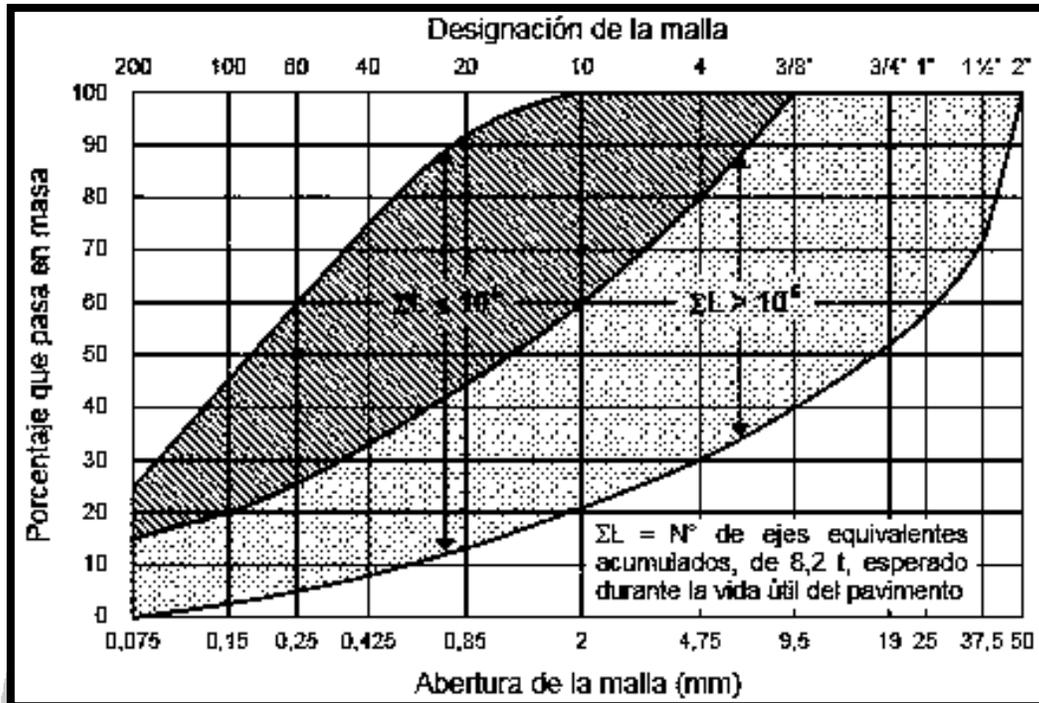


FIG. 3 Zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases. Fuente: SCT, N-CMT-4-02-001/04

Tabla 2.4 Requisitos de Calidad de los materiales para Subbases de pavimentos asfálticos. Fuente: SCT, N-CMT-4-02-001/04

Características	Valor	
	$\Sigma L \leq 10^6$ ^[1]	$\Sigma L > 10^6$ ^[1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	10	6
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	30	40
Valor Soporte de California (CBR) ^[2,3] , mínimo	50	60
Desgaste de los Ángeles ^[2] , máximo	50	40
Partículas alargadas y lajeadas ^[2] , máximo	40	35
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL =Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 ton, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante los procedimientos de prueba que corresponda, de los



Manuales que señalan en la Cláusula C. de la N-CTM-4-02-002/4.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASTHO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

2.3.3 Terracerías

De acuerdo con Olivera (1994), las terracerías son el volumen de material que se extrae o sirve de relleno para la construcción de una vía terrestre. Si se necesita extraer material fuera de la línea de corte se tendrán zonas de préstamo. Si están entre 10 y 100 m se les llaman préstamo lateral. Si las zonas de préstamo se encuentran a más de 100 m se denominan préstamos de banco.

Las terracerías en terraplén se dividen en dos zonas; El cuerpo del terraplén que es la parte inferior, y la capa subrasante con un espesor mínimo de 20 cms. cuando la intensidad de tráfico (ΣL) sea igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes, de 30 cms. cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de 1 millón a 10 millones de ejes equivalentes, cuando la intensidad de tránsito sea mayor a 10 millones de ejes equivalentes, la capa subrasante será sujeta a un diseño especial. (SCT, N-CMT-1-03/02).

Tabla 2.5 Requisitos de Calidad de los materiales para terracerías de pavimentos asfálticos. Fuente: SCT, N-CMT-1-01-02

Característica	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor soporte de California (CBR [1]; %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación [2]; %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1.5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASTHO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Cuando el material sea no compactable, de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos, se colocará en capas del espesor mínimo que permita el tamaño máximo del material y se bandeará, previa aplicación de un riego de agua a razón de 150 L/m³, dando como mínimo tres pasada en toda la superficie en cada capa, con un tractor de 36.7 t con orugas.

2.3.4 Cuerpo del terraplén

Su finalidad, es dar la altura necesaria para cumplir con las especificaciones geométricas. Resistir las cargas del tránsito que se transfieren por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos al terreno natural (Olivera, 1994).

Según la SCT, los materiales utilizados para su construcción deben tener un tamaño



máximo de 7.5 cm. y un límite líquido menor a 50%. El cuerpo del terraplén debe tener una expansión máxima de 5%, un VRS de 5% mínimo y un grado de compactación de 90%.

2.4 CARPETA ASFÁLTICA

La carpeta asfáltica es la parte superior de un pavimento flexible. Es una capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base.

Olivera (1994) cita que los materiales pétreos son suelos inertes que se consiguen en ríos, arroyos o depósitos naturales. Para poder ser empleados en la carpeta asfáltica deben cumplir con ciertas características dadas por la granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto.

El contenido óptimo de asfalto para una carpeta, es la cantidad de asfalto que se necesita para formar alrededor de la partícula una membrana con un espesor suficiente para resistir los elementos del intemperismo, para que el asfalto no se oxide. El espesor no debe ser muy grande porque se pierde resistencia y estabilidad.

Se recomienda que las partículas que se utilicen tengan forma cúbica, ya que las que son en forma de laja o de aguja pueden romperse muy fácilmente y afectar la granulometría.

Las funciones de la carpeta asfáltica son las siguientes (Olivera, 1994):

- Proporcionar una superficie de rodamiento que permita un tránsito fácil y cómodo para los vehículos.
- Impedir la infiltración de agua de lluvia hacia las capas inferiores.
- Resistir la acción de los vehículos.

2.4.1 Cemento asfáltico

El asfalto, llamado cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo. A temperaturas normales, es sólido y posee un color café oscuro.

Para poder mezclarlo con los materiales pétreos, éste debe tener normalmente una temperatura superior a los 140 °C (Olivera, 1994).

2.4.2 Rebajados Asfálticos

Los rebajados asfálticos se utilizan para fluidificar al cemento asfáltico y poderlo trabajar a menores temperaturas. Para fabricar los rebajados asfálticos, se diluye el concreto asfáltico en gasolina, tractolina, diesel o aceites ligeros. Los que son diluidos en gasolina, forman rebajados de fraguado rápido. Los que se diluyen en tractolina son de fraguado medio y los que se diluyen en diesel o en aceites ligeros son de fraguado lento. Los tres fraguados FR, FM y FL se pueden utilizar con diferentes proporciones de cemento asfáltico y de solventes.

2.4.3 Emulsiones asfálticas

De acuerdo con el Ingeniero Carlos Crespo (1996), las emulsiones asfálticas tienen grandes ventajas ya que son fáciles de emplear. La finalidad de las emulsiones es trabajar a temperatura ambiente con asfalto que a esta temperatura no es manejable debido a que



es semi - sólido. Las emulsiones asfálticas son líquidos de color chocolate casi tan fluidos como el agua y de la cual contienen entre 40% y 50%.

Si se usan emulsiones, puede existir un problema de adherencia entre el material pétreo y el cemento asfáltico ya que contienen gran cantidad de agua. Las cargas eléctricas que recubren a las gotas de cemento asfáltico pueden favorecer dicha adherencia si existe diferencia de signos entre los áridos y las gotas de cemento.

2.4.4 Carpetas de concreto asfáltico

Olivera (1994) define a las carpetas de concreto asfáltico como mezclas de materiales pétreos y cemento asfáltico. Como el cemento asfáltico es sólido a temperatura ambiente, es necesario calentarlo. Este aumento en la temperatura, se tiene que hacer en plantas, ya que la temperatura del cemento asfáltico necesita llegar a cerca de 140 °C y la temperatura de los materiales pétreos necesita llegar a cerca de 160°C.

Este tipo de carpetas, deben de ser construidas sobre bases hidráulicas o sobre bases asfálticas impregnadas. Si se llegan a construir sobre bases naturales con módulos de elasticidad bajos, sufrirá deformaciones ante las cargas del tránsito, la resistencia no será la deseada y su ruptura será frágil.

Para conocer el contenido óptimo del concreto asfáltico se utiliza normalmente la prueba Marshall.

Para poder construir las carpetas de concreto asfáltico, se deben de seguir los siguientes pasos:

- Elegir los bancos de material pétreo y llevarlos al laboratorio para poder elegir el banco adecuado.
- Hacer el proyecto granulométrico en el laboratorio para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico.
- Extraer el material.
- Proporcionar pétreos en frío a la planta de mezclado.
- Transportar el material al cilindro de calentamiento y secado donde alcanzará una temperatura entre 150 °C y 170 °C.
- Alcanzada la temperatura deseada, el material pétreo se sube a la unidad de mezclado, donde se mezcla con el cemento asfáltico que se encuentra entre los 130 °C y 140 °C.
- Llevar la mezcla al tramo con una temperatura mínima entre 110°C y 120°C. La mezcla debe descargarse en la finisher que se encarga de extenderlo y darle una ligera compactación.
- La compactación debe iniciarse a una temperatura mayor a los 90°C. con un rodillo de 7 ton. para dar un primer armado y evitar desplazamiento de la mezcla. Después con uno de 15 ton. El grado mínimo de compactación es de 95% del peso volumétrico del proyecto.



Una carpeta que tiene menos asfalto del necesario, se desgranará, en el caso contrario, el asfalto brotará a la superficie haciéndola lisa y resbaladiza.

2.5 FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Según Rico y Del Castillo (1984), la tecnología que se ha desarrollado para pavimentos, tiene como meta evitar deterioros y fallas. Se han logrado establecer relaciones de causa - efecto, para desarrollar normas de criterio de proyecto y conservación. En pavimentos, la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos como deterioros simples. El concepto de deterioro o falla está asociado al nivel de servicio que depende de la exigencia del consumidor. Una falla es algo que se aparta de lo que se consideró perfecto. Las fallas de los pavimentos pueden dividirse en tres grupos:

- Falla por insuficiencia estructural.
- Falla por defectos constructivos.
- Falla por fatiga.

2.5.1 Falla por insuficiencia estructural

Pavimentos construidos con material inapropiado en cuanto a resistencia. Se pueden utilizar materiales con buena calidad pero espesores insuficientes. Esta falla se produce por la combinación de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus espesores.

2.5.2 Falla por defectos constructivos

Pavimentos bien proporcionados y con materiales de buena calidad pero que en su construcción se cometieron errores.

2.5.3 Falla por fatiga

Pavimentos que originalmente estuvieron bien proporcionados y construidos, con el paso del tiempo y la continua repetición de cargas sufren efectos de fatiga, degradación estructural, pérdida de resistencia y acumulan deformaciones.

Aparte de estos tres grupos, también se agrupan por su origen, es decir por el modo en que suceden y se manifiestan. Se separan en tres nuevos grupos que son: por fracturamiento, por deformación y por desintegración. Se relacionan con el efecto del tránsito, las características y estructuración del pavimento y el apoyo que proporciona la terracería.

Las fallas por insuficiencia estructural, defecto constructivo o fatiga pueden ser a fin de cuentas causadas por el fracturamiento, la deformación y la desintegración (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.4 Fallas comunes en los pavimentos

Existen distintas fallas comunes en los pavimentos, entre ellas, se encuentra el agrietamiento en "piel de cocodrilo", deformación permanente en la superficie del pavimento, fallas por cortante, agrietamiento longitudinal, consolidación del terreno de cimentación, etc.



2.5.5 Agrietamiento en “Piel de cocodrilo”

Es un agrietamiento que se extiende sobre toda la superficie de rodamiento. Se da por el movimiento excesivo de una o más capas del pavimento o por fatiga de la carpeta. Es común en pavimentos construidos en terracerías resilientes. Es típico de bases débiles o insuficientemente compactadas. Puede formarse en lugares donde existe el congelamiento o en lugares que se requiere subdrenaje. Este fenómeno puede ser progresivo generando la destrucción del pavimento, que comienza por desprenderse de la carpeta y la remoción de los materiales granulares expuestos. Es importante estudiar la causa, ya que si es por fatiga el progreso es muy lento, en cambio si es por deficiencia estructural o por exceso de agua el progreso es muy rápido.

2.5.6 Deformación permanente en la superficie del pavimento

De acuerdo con Rico y Del Castillo (1984), la deformación permanente en la superficie del pavimento está asociada al aumento de compacidad en las capas de base o sub-base, debida a cargas excesivas, cargas repetidas o rotura de granos. También puede darse por consolidación en la subrasante. Por lo general, el ancho del surco es mayor al ancho de una llanta.

2.5.7 Fallas por cortante

Se debe a la falta de resistencia al esfuerzo cortante de la base o sub-base. En raras ocasiones por falta de resistencia en la subrasante. Generalmente se hacen surcos profundos y bien marcados cuyo ancho no excede al de una llanta (Rico y Del Castillo, 1984).

2.5.8 Agrietamiento longitudinal

Grietas longitudinales de una abertura aproximada de 0.5 cm en el área de circulación de las cargas más pesadas. Se deben a movimientos en las capas del pavimento en dirección horizontal. Este fenómeno, se da en la base, en la sub-base y con regularidad en la subrasante. El fenómeno se da por congelamiento, deshielo o por cambios volumétricos en la variación de agua en la subrasante.

2.5.9 Consolidación del terreno de cimentación

La consolidación del terreno de cimentación produce distorsión del pavimento independientemente de los espesores o de su condición estructural. Se pueden producir agrietamientos longitudinales y agrietamientos con trayectoria circular.

2.6 DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DE LAS CARRETERAS

Considerando el apartado anterior, el desarrollo de técnicas innovadoras para la construcción y/o rehabilitación de los caminos en nuestro país toma una importancia considerable. Es aquí donde el reciclado de las mezclas asfálticas nos brinda la oportunidad de llevar a cabo tales fines.

La red carretera en nuestro país se encuentra en un estado físico fuera de lo deseado, donde los costos de operación son elevados y donde además la optimización de los recursos está muy lejos de ser la idónea.



Los esfuerzos que se han venido realizando en los últimos tiempos en el área de la investigación, si bien no al ritmo deseado, están contribuyendo a mejorar la red carretera del país.

Aunque el reciclado de las mezclas asfálticas nos brinda una excelente oportunidad de realizar mezclas asfálticas con mezclas asfálticas recuperadas de pavimentos (RAP) y que cumplan con las especificaciones de desempeño estipuladas por la dependencias involucradas en este tema, es necesario demostrar que dicha técnica funciona de manera correcta, es por ello que en éste trabajo en el capítulo siguiente se podrán observar los estudios realizados y sobre todo los resultados obtenidos a muestras con RAP incluido.





Capítulo 3

3 RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Las carreteras son una de las principales herramientas que favorecen y estimulan el desarrollo económico y social de un país; constituyen el principal medio de comunicación. los caminos y las carreteras inducen la creación de cadenas económicamente favorables por el movimiento de mercancías y de esta manera favorecen el comercio y la industria. Por lo tanto, es sin duda alguna imprescindible construir dichos elementos de la mejor manera, garantizando calidad y con ello prolongar en cuanto sea posible su vida útil.

Durante los últimos años, el transporte en México ha sufrido cambios significativos tanto en el aspecto de cantidad de vehículos como de las cargas que son capaces de transportar y de igual forma las exigencias de los usuarios han cambiado, pidiendo mayores estándares de confort y seguridad.

En la actualidad la sociedad ha incrementado la sensibilidad y el interés sobre el cuidado del medio ambiente. lo que nos lleva a optimizar el uso de los materiales dispuestos, es decir la reutilización de los materiales toma una importancia significativa. Para el caso de los pavimentos asfálticos, siendo que para su conformación se utilizan materiales no renovables es indispensable lograr utilizar los recursos existentes.

Todo lo antes mencionado nos conlleva a tener la necesidad de mejorar las técnicas de diseño, construcción y rehabilitación de la red carretera, para este caso, se pretende por medio de la metodología Marshall incorporar un porcentaje de material de pavimento asfáltico recuperado. Asegurando alcanzar los estándares de calidad necesarios para el correcto desempeño de la nueva mezcla asfáltica.



3.1 OBJETIVO DEL RECICLADO.

Sin duda alguna como ya se ha mencionado anteriormente y quizás de forma repetitiva, entre los objetivos prioritarios del reciclado de mezclas asfálticas son, tanto optimizar los recursos económicos, es decir el dar una herramienta a los constructores de caminos con la que puedan disminuir los gastos generados ya sea por la rehabilitación o por la construcción de una vialidad, así mismo, de igual forma aprovechando el producto derivado del fresado de una carpeta asfáltica se pretende poder abatir de una manera singularmente importante el impacto ambiental.

Dado que nos encontramos dentro de un sistema totalmente globalizado y donde el aspecto económico, es decir, en cuánto dinero se posee o cuánto se es capaz de generar, el reciclado o reutilización de un producto existente que ha perdido sus condiciones iniciales, nos permite sin duda alguna un ahorro sustancial, dado que se disminuye el consumo de productos, para este caso se minimiza el uso de agregados pétreos vírgenes y de asfalto, considerando esto, los costos en la producción de una nueva mezcla asfáltica, y que además, posea las características de calidad comparada con una mezcla sin la inclusión de RAP, impactará de una manera sumamente importante en la economía de todos los involucrados en la construcción y/o rehabilitación de pavimentos asfálticos.

Sin olvidar el tema ecológico, que cada día toma una importancia preponderante en todas las sociedades a nivel mundial, el impacto generado por el desperdicio inconmensurado de un producto como una mezcla asfáltica, que además está conformada por materias primas de origen natural y sobre todo no renovables, y dado que, considerando que en México gran parte de las mercancías, las cuales generan un movimiento económico, son desplazadas por vía terrestre y esto nos lleva a la gran necesidad de la construcción de nuevas vías y así mismo en la rehabilitación de las existentes, secuencialmente esto nos lleva a la situación irremediable de utilizar los productos antes mencionados. Considerando esto, la demanda de nuevos productos nos lleva a un abuso irracional y por lo tanto a un impacto ecológico, que de seguir así, nos traerá grandes problemáticas a corto plazo.

Por lo tanto, el lograr mediante la técnica del reciclado de mezclas asfálticas el minimizar el uso de nuevos productos para su diseño y fabricación nos traerá múltiples beneficios, ya aprovechamos el material existente, lo cual cabe señalar que a pesar de encontrarse envejecido, aún conserva muchas de sus principales propiedades y esto nos permite obtener excelentes resultados en las mezclas recicladas en las cuales se les incorpore este material.

Actualmente en México todo el producto RAP, o por lo menos gran parte de este, se ha estado desperdiciando de una manera exagerada, dentro de los motivos de este hecho, se podrían mencionar una gran cantidad, sin embargo, los principales son sin duda alguna, la falta de conocimientos técnicos en el tema y la renuencia al cambio de técnicas de construcción o de diseño de pavimentos asfálticos.



3.2 ANTECEDENTES DEL RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

La tendencia actual en el tratamiento de residuos es el aprovechamiento máximo en sus recursos mediante la reutilización, reciclado, etc. Antes de su vertido y eliminación, todo ello con el objetivo de cuidar el medio ambiente, evitar la saturación de los vertederos y contribuir a la disminución en el uso de materias primas naturales.

Las posibilidades del reciclado son muy amplias, tal es el caso del reciclado de mezclas asfálticas, que actualmente es una tendencia a la alza para la rehabilitación de carreteras.

Uno de los motivos que impulsó las técnicas de reciclado de mezclas asfálticas, fue la crisis de precios del petróleo en los años 70. Esta crisis, no solo hizo que subiera el precio del asfalto, elemento fundamental en la pavimentación, sino que además surgió el planteamiento de un ahorro de energía. Aproximadamente los costos de reparación de firme mediante técnicas de reciclado o sustitución suponen ahorros económicos de hasta un 25 % y, aproximadamente 7000 toneladas de material pétreo por kilómetro.

La historia del reciclado de mezclas asfálticas se remonta a principios del siglo pasado. Sin embargo, no fue sino hasta el embargo del petróleo de los años 70's que la práctica moderna del reciclado de mezclas asfálticas realmente se difundió.

En ese tiempo, había muy poca experiencia en la tecnología y diseño de mezclas asfálticas, diseño de pavimentos, así como su construcción y desempeño de pavimentos reciclados se consideraba experimental o desconocido. Sin embargo, las prácticas de la construcción evolucionaron y entre 1978 y 1980, el Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras (NCHRP) publicó la síntesis práctica de carreteras Num. 54, y el reciclaje de materiales para carreteras en su reporte Num. 244, con las directrices para el reciclaje de los materiales de pavimentos, el cual hizo que se utilizara la experiencia de numerosas dependencias y organizaciones que proporcionó un acercamiento práctico al reciclado del pavimento.

De acuerdo con la administración Federal de Carreteras (FHWA) (1993), en Estados Unidos se logró aproximadamente la cantidad anual de 80 millones de toneladas de reciclado de mezclas asfálticas.

En la mayoría de los países del mundo el reciclado de mezclas asfálticas es un tema aun nuevo, y México no es la excepción, sin embargo es por ello que surge la necesidad de investigar y probar estas técnicas.

Las especificaciones del estado normalmente permiten la incorporación del pavimento asfáltico recuperado en las mezclas asfálticas en caliente (HMA). El procedimiento del diseño de la mezcla Superpave ha sido modificado para evaluar la HMA con material de pavimento asfáltico recuperado (RAP) (McDaniel y Anderson, 2001), sin embargo para la metodología Marshall no se tienen normativas para realizar la inclusión de RAP en las mezclas asfálticas.

Las empresas productoras de HMA, en 2006, se encontraban en una situación comparable a la de los años setenta durante el embargo petrolero.

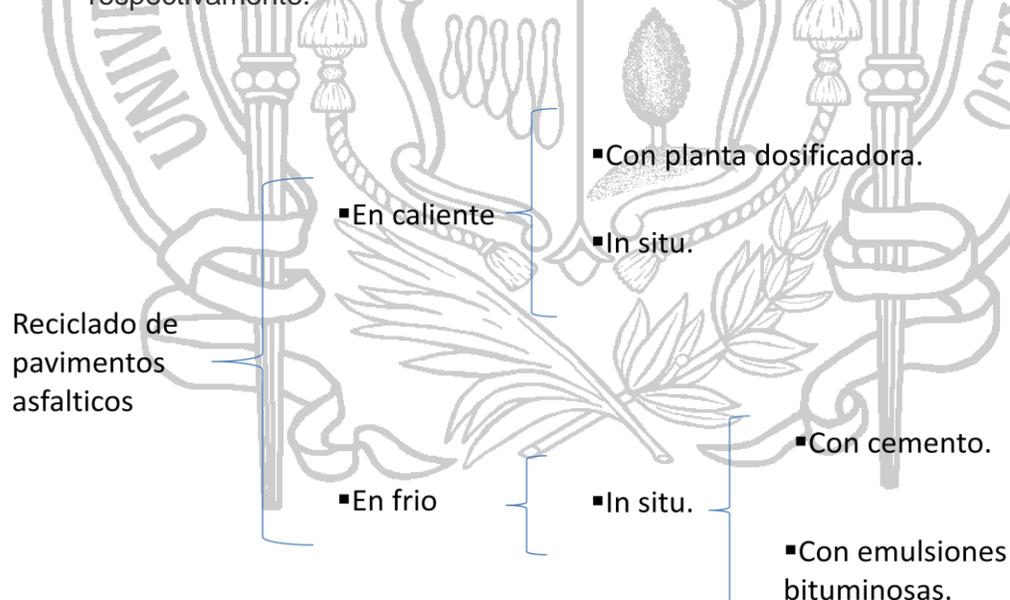


Hubo un rápido aumento en los costos de energía y en los ligantes asfálticos, dando como resultado un incremento económico en la fabricación y transporte de dichos materiales, así como la escasez de ligante de asfalto en algunas regiones del país. Además, en esta época aumentó la preocupación por el medio ambiente que se derivó en la dificultad para permitir la explotación de nuevas reservas de material pétreo.

3.3 TIPOS DE RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Consiente se está de la gran necesidad de la rehabilitación de las vías terrestres en el país, se cuentan con varias opciones para llevar a cabo este proceso, una vez que se haya tomado la decisión de mejorar la capacidad estructural del firme, se dispone de varias técnicas diferentes para llevarla a cabo, entre las importantes podríamos mencionar las siguientes:

- técnicas convencionales o clásicas, se trata de las técnicas usuales que se utilizan de forma generalizada actualmente. con estos métodos los deterioros más importantes se corrigen colocando una capa de refuerzo superficial a base de materiales vírgenes. si los deterioros son muy importantes, se procede a retirar el grosor defectuoso y se sustituye por nuevas capas de mezcla bituminosa.
- técnicas de reciclado, este tipo de metodología se basa en la reutilización de los materiales del firme defectuoso. junto con estos materiales envejecidos, se pueden añadir otros elementos (agentes rejuvenecedores, nueva mezcla bituminosa, etc.). estas técnicas se pueden dividir en varios tipos diferentes. como cualquier método constructivo y en este caso de diseño, la metodología para el reciclado de un pavimento asfáltico se puede elaborar de dos formas básicas, en frío y en caliente, estas a su vez desprenden un par de opciones respectivamente.



Considerando lo anterior, para el presente trabajo tomaremos en consideración el reciclado en caliente con planta dosificadora.



Dado que por sus componentes se considera con mayor eficacia utilizar esta opción dado que, nos permite mantener controles de calidad en obra con mayor facilidad, en comparación a los métodos restantes.

3.3.1 Reciclado in situ en caliente

Se reutiliza un porcentaje de los materiales extraídos del firme envejecido mediante un tratamiento con aportación de calor que se realiza en el mismo lugar de la obra.

El firme se calienta mediante unos quemadores y se fresa un grosor determinado. Este material es mezclado normalmente con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla.

Finalmente la nueva mezcla se extiende y se compacta mediante procedimientos convencionales.

3.3.2 Reciclado en caliente con planta dosificadora

Este procedimiento permite reciclar el conjunto o solo una cierta porción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

Dadas todas las técnicas de conservación posibles, debe hacerse un análisis de cada una de ellas teniendo en cuenta todas las condicionantes que las puedan afectar. Algunas de las más importantes podrían llegar a ser:

- Costo. cada técnica tendrá un cierto costo que hay que tratar de minimizar. el costo se puede considerar en términos económicos, sociales y medioambientales.
- Experiencia. las empresas y los técnicos pueden tener más experiencia con una técnica que con otra, con lo que las garantías del éxito son diferentes en cada caso. este punto es muy importante dado que para el caso del reciclado de las mezclas asfálticas, en México se cuenta con una experiencia prácticamente nula y la capacitación al personal involucrado en estas técnicas resulta totalmente esencial.
- Equipos disponibles. las empresas deben tener disponibles equipos humanos y materiales necesarios para poder utilizar una determinada técnica. En México actualmente la maquinaria para llevar a cabo la técnica del reciclado aun se encuentra lejos de ser la óptima, sin embargo la tendencia a la adquisición de esta equipación es positiva.

3.3.3 Reciclado in situ en frío con cemento

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.



3.3.4 Reciclado in situ en frío con emulsiones bituminosas

Esta técnica, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables. el procedimiento usual y básico consiste fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- Fresado en frío de un cierto grosor del firme.
- Mezclado del material RAP obtenido con una porción determinada de emulsión asfáltica y otros aditivos de ser necesario.
- Extensión en obra de la nueva mezcla.
- Compactación enérgica.
- Curado de la capa reciclada.
- Extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla en caliente.

Como se puede observar la técnica del reciclado de las mezclas asfálticas además de brindarnos importantes beneficios, nos otorga varias formas de realizar dicha actividad, por lo que su implementación se vuelve aún más fácil.

Sin lugar a dudas estas técnicas aun se encuentra en una etapa de explotación mínima, por lo que trabajos como el presente, tendrá como objetivo el fomentar y demostrar los beneficios del reciclado de mezclas asfálticas.

En el capítulo siguiente podremos adentrarnos a la parte de las pruebas realizadas al material asfáltico recuperado, así como al desempeño mostrado en las mezclas con este producto incluido.



Capítulo 4.

4 PRUEBAS DE LABORATORIO.

Las condiciones actuales a las que se someten las carreteras y caminos en el país han sufrido cambios significativos por lo que se hace indispensable mejorar las técnicas de construcción y rehabilitación a dichas estructuras. Para lograr dicho objetivo, es imprescindible la realización de estudios anticipados a los materiales a utilizar en un pavimento lo que nos permite definir sus características y sobre todo su desempeño una vez que interaccionen con las cargas vehiculares.

Durante este capítulo se podrán observar los estudios realizados a los agregados pétreos, al asfalto de aportación y las mezclas asfálticas recicladas (RAP), ya que cada uno de estos materiales presenta condiciones especiales que afectarán o beneficiarán a la mezcla asfáltica.

Como ya se ha mencionado, los estudios realizados se hicieron considerando las especificaciones de la metodología de diseño de mezclas Marshall.



4.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO MARSHALL.

En México se ha utilizado de forma constante y frecuente la metodología de diseño de mezclas asfálticas Marshall.

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezcla.

El ensayo Marshall es un método ideado para dosificar las mezclas asfálticas empleando asfaltos sólidos y material granular que no supere un tamaño máximo de 2.54 cm (1"). Mediante la prueba, se obtiene la cantidad apropiada de asfalto para poder garantizar la suficiente estabilidad y así mismo las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones, un buen recubrimiento de partículas para obtener un pavimento durable incluyendo el factor de la compactación.

Los datos más importantes del diseño de las mezclas por el método Marshall son: un análisis de densidad, relación de vacíos y una prueba de estabilidad y flujo, sobre muestras compactadas.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 1/2") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollada a 60°C cuando es ensayado. El valor del flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

La finalidad del diseño Marshall es obtener las cantidades óptimas de los contenidos que hacen parte de la mezcla asfáltica, con el fin de satisfacer las exigencias de servicio teniendo en cuenta diferentes criterios de análisis como son el flujo, la estabilidad, vacíos con aire en la mezcla y vacíos en los agregados pétreos, garantizando un pavimento lo mas durable posible, con un contenido de asfalto óptimo que recubra, impermeabilice y ligue el material pétreo.

El diseño Marshall se realizó según la norma I.N.V.E-748.

4.1.1 GRANULOMETRÍA

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa la abertura de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño nominal del agregado



y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligados para la curva granulométrica. La tabla 3.1 presenta los tamaños nominales más usuales.

TABLA 3.1 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL). Fuente: SCT, N-CMT-4-04/02

Abertura mm	Malla Designación	Tamaño nominal del material pétreo (in)					mm
		9.5 (³ / ₈)	12.5 (¹ / ₂)	19 (³ / ₄)	25	(1)	
Porcentaje que pasa							
50	2"						100
37.5	1 ¹ / ₂ "				100		90 - 100
25	1"			100		90 - 100	74 - 90
19	³ / ₄ "		100		90 - 100	79 - 90	62 - 79
12.5	¹ / ₂ "	100		90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9.5	³ / ₈ "	90 - 100		76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6.3	¹ / ₄ "	70 - 81		56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4.75	N°4	56 - 69		45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 24
2	N°10	28 - 42		25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0.85	N°20	18 - 27		15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0.425	N°40	13 - 20		11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0.25	N°60	10 - 15		8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0.15	N°100	6 - 12		5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0.075	N°200	2 - 7		2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

4.1.2 ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA.

Las mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el procedimiento descrito en el manual M-MMP-4-05-034, método Marshall para mezclas asfálticas de granulometría densa, de acuerdo con el tránsito esperado en términos de número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirán con los requisitos de calidad estipulados en la Tabla 3.2 y con el porcentaje de vacíos en el agregado pétreo (VAM) indicado en la Tabla 3.3, en función del tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla.



TABLA 3.2 Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

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

Fuente: SCT, N-CMT-4-05-003-02

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

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

TABLA 3.3 Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

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

Fuente: SCT, N-CMT-4-05-003-02

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

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el llevar a cabo una conservación o rehabilitación de una carretera nos permite mantener las propiedades esenciales de un



pavimento (seguridad, confort y rapidez). Una de las acciones políticas que permite la opción de realizar dichas actividades es mediante la implementación de los Contratos Plurianuales de Conservación de Carreteras (CPC). En los últimos años bajo el marco de esta estrategia implementada a nivel nacional ha fomentado el uso de nuevas actividades de conservación de la red carretera nacional, para nuestro caso los trabajos ejecutados en el tramo carretero Zacapu - Carapan de la carretera federal N° 15 Morelia - Guadalajara, donde se realizaron trabajos de rehabilitación al pavimento asfáltico. La propuesta inicial fue el fresar un porcentaje del espesor presente en la carpeta asfáltica y reutilizar ese material recuperado, sabiendo que el RAP es un producto reciclable y puede ser incorporado en una nueva carpeta asfáltica.

Sin embargo los trabajos en campo presentaron una serie de problemáticas al incorporar el RAP, el poco conocimiento sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en el personal encargado de la ejecución de las obras, así como, el manejo de la maquinaria implementada, resulta crucial en estos procesos. Dado estas situaciones antes mencionadas se declino a no utilizar el material recuperado, es por ello la importancia de este trabajo de investigación, el permitir demostrar los beneficios que se tienen al aprovechar el RAP bajo la metodología de diseño de mezclas asfálticas Marshall.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL RAP (RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT).

Para lograr un uso óptimo de las mezclas asfálticas recicladas, es importante asegurar la calidad de los materiales elegidos y sus propiedades finales combinadas y que cumplan con las especificaciones para su aplicación. El RAP, los nuevos agregados y el ligante virgen necesitan ser procesados y probados para comprobar su conveniencia para diferentes tipos de mezclas HMA. Los requerimientos que exigen AASHTO, ASTM y la SCT deberán ser utilizados para establecer la calidad de los materiales constituyentes.

Para el caso del RAP es de suma importancia conocer sus principales características, por lo que se hace necesario llevar a cabo pruebas que nos permitan llegar a la caracterización del material.

Las dos características más importantes del reciclado son la graduación del agregado y el contenido de asfalto. Además de esto, especialmente en mezclas de alto contenido de RAP, mezclas de superficie, y lugares de alto volumen de tránsito es necesario cuantificar la calidad del agregado pétreo presente en el RAP y las propiedades del ligante.

4.3 MUESTREO DEL RAP

Antes de hacer cualquier prueba, se deben obtener las muestras de los materiales. El método más común de muestreo del RAP, consiste en tomar un número de muestras al azar de una pila completa de agregado reciclado, probar una porción de cada muestra individual y combinar estas muestras al azar dentro de una muestra representativa para conducir el diseño de mezcla. La prueba de muestras individuales es necesaria para determinar la variabilidad del contenido de asfalto y la graduación del agregado. Aproximadamente de 5 a 10 muestras individuales son requeridas para esta prueba y

análisis para determinar la consistencia del acopio. Se recomienda que el muestreo de RAP durante el proceso sea retenido para el diseño de muestra.

El mezclado de muestras individuales al azar de cada pila de agregado es requerido para proporcionar una muestra representativa.



FIG. 4.1 Material RAP en campo .



4.4 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.

Haciendo referencia a lo anteriormente mencionado, se procedió a obtener la granulometría del RAP, y de esta forma conocer su caracterización en la distribución del tamaño de sus partículas.

TABLA 4.2 Granulometría del material RAP .

Designación	Abertura (mm)	% Que pasa									
		Muestra 1 RAP		Muestra 2 RAP		Muestra 3 RAP		Muestra 4 RAP		Muestra 5 RAP	
		kg	%								
1"	25	0.261	91.274	0.213	92.792	0.246	91.781	0.305	89.840	0.369	87.679
3/4"	19	0.198	84.654	0.178	86.768	0.083	89.008	0.242	81.779	0.367	75.426
1/2"	12.5	0.180	78.636	0.213	79.560	0.153	83.896	0.261	73.085	0.348	63.806
3/8"	9.5	0.294	68.806	0.296	69.543	0.204	77.080	0.279	63.791	0.347	52.220
1/4"	6.3	0.431	54.397	0.462	53.909	0.336	65.854	0.420	49.800	0.406	38.664
No. 4	4.75	0.217	47.141	0.237	45.888	0.178	59.906	0.213	42.705	0.196	32.120
No. 10	2	0.680	24.407	0.768	19.898	0.716	35.984	0.721	18.688	0.561	13.389
No. 20	0.85	0.315	13.875	0.296	9.882	0.379	23.321	0.265	9.860	0.175	7.546
No. 40	0.425	0.268	4.915	0.212	2.707	0.456	8.086	0.227	2.298	0.180	1.536
No. 60	0.25	0.060	2.909	0.043	1.252	0.119	4.110	0.032	1.233	0.022	0.801
No. 100	0.15	0.055	1.070	0.022	0.508	0.078	1.504	0.017	0.666	0.011	0.434
No. 200	0.075	0.022	0.334	0.010	0.169	0.036	0.301	0.012	0.266	0.008	0.167
charola		0.010	0.000	0.005	0.000	0.009	0.000	0.008	0.000	0.005	0.000

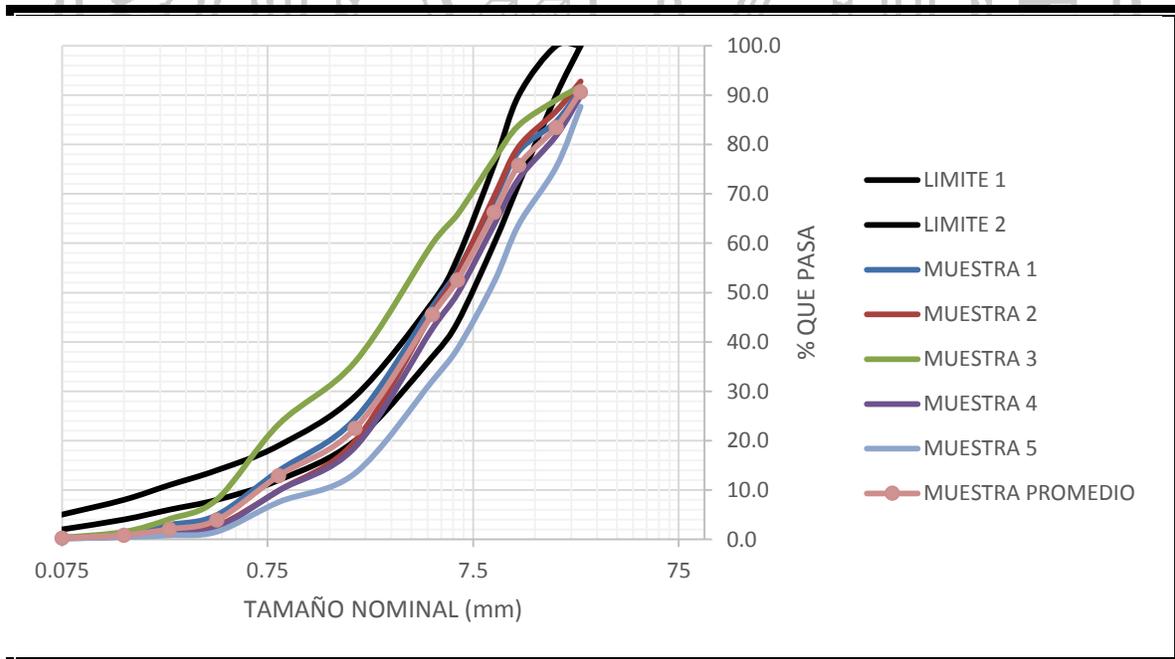


FIG. 4.3 Gráfica de granulometría del RAP.

Con los resultados obtenidos en esta prueba, se determina que, el RAP presenta un tamaño nominal de 3/4", por lo que se requiere llevar a cabo un procedo adicional que nos



permita disminuir ese tamaño y además que nos ayude a obtener un material más homogéneo en la distribución de sus tamaños.

Este nuevo proceso se llevará a cabo mediante una disgregación mecánica, dada su escala en campo esta actividad se podría llevar a cabo mediante dos opciones, la primera sería en una etapa preventiva, al momento de estar siendo fresado el pavimento recuperado, la máquina debe estar sujeta a una supervisión de control de calidad la cual permita mantener calibrada la apertura de las punta de diamante de la maquinaria de acuerdo al tamaño que se desee obtener; la segunda opción sería ya en una etapa correctiva, si el material ya se encuentra fresado se tendría que pasarlo por una máquina trituradora calibrada de tal forma que nos brinde una distribución d tamaños deseados en el material

TABLA 4.4 Granulometría del material RAP (disgregado).

Designación	Abertura (mm)	% Que pasa					
		Muestra 1 Lavado		Muestra 2 Lavado		Muestra 3 Lavado	
		kg	%	kg	%	kg	%
1"	25	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/4"	19	0.099	92.390	0.144	89.859	0.076	94.449
1/2"	12.5	0.305	68.947	0.284	69.859	0.206	79.401
3/8"	9.5	0.230	51.268	0.277	50.352	0.317	56.245
1/4"	6.3	0.199	35.972	0.223	34.648	0.249	38.057
No. 4	4.75	0.082	29.669	0.091	28.239	0.083	31.994
No. 10	2	0.197	14.527	0.194	14.577	0.218	16.070
No. 20	0.85	0.050	10.684	0.039	11.831	0.037	13.367
No. 40	0.425	0.093	3.536	0.116	3.662	0.129	3.944
No. 60	0.25	0.019	2.075	0.022	2.113	0.023	2.264
No. 100	0.15	0.014	0.999	0.016	0.986	0.017	1.023
No. 200	0.075	0.009	0.307	0.009	0.352	0.009	0.365
charola		0.004	0.000	0.005	0.000	0.005	0.000

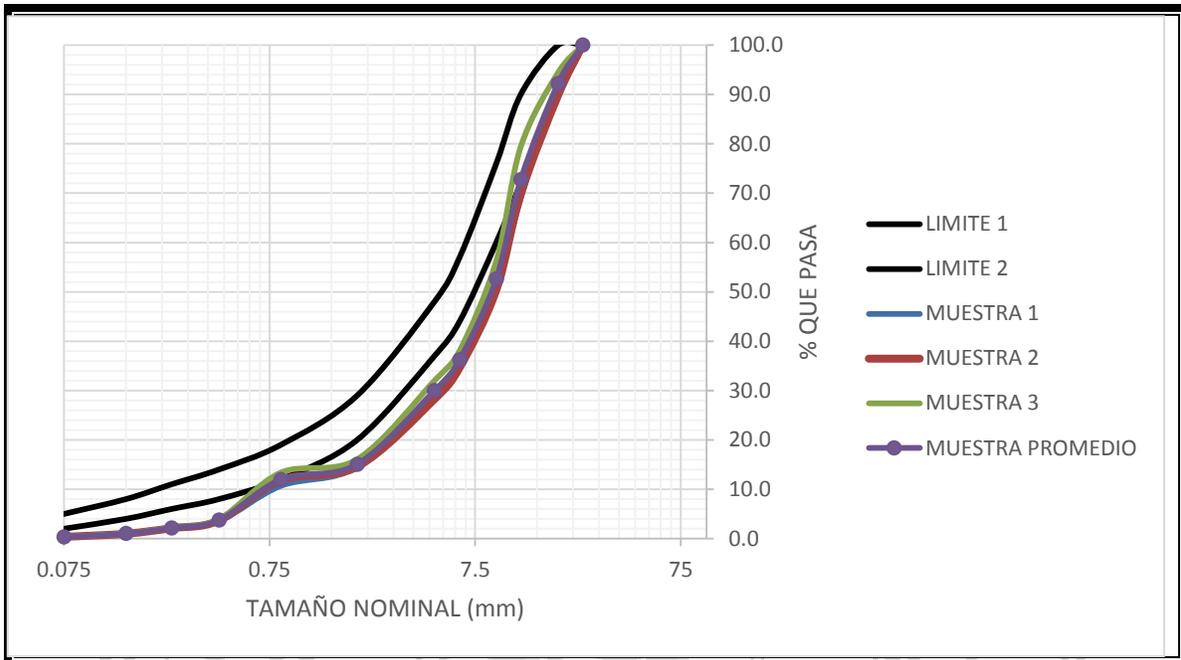


FIG. 4.5 Granulometría del material RAP (disgregado).

4.5 PRUEBA DE PORCENTAJE DE ASFALTO.

La realización de esta prueba nos permitirá determinar la cantidad de asfalto presente en el pavimento asfáltico recuperado, expresada dicha cantidad en porcentaje.

Dicha prueba se realizó por medios mecánicos utilizando el aparato rotarex, el cual mediante fuerza centrífuga y solvente, el material introducido es lavado.



FIG. 4.6 Equipo Rotarex.



El determinar la cantidad de asfalto en el material analizado, nos permite definir características del material recuperado, tales como granulometría del agregado pétreo que conforma al pavimento asfáltico recuperada, así mismo el porcentaje de asfalto presente en el RAP influirá de forma directa en el diseño de la nueva propuesta de mezcla asfáltica.

TABLA 4.7 Porcentaje de asfalto en el RAP

N° de muestra	peso de la muestra con asfalto (gr)	peso del material sin asfalto (gr)	% de asfalto
1	498	450	10.67
2	499	450	10.89
PROMEDIO			10.78

Los resultados obtenidos en esta prueba nos indica un alto contenido asfáltico en el pavimento recuperado, esto puede ser por situaciones variadas, una de ellas podría ser, que el pavimento estuvo sujeto a rehabilitaciones de la carpeta asfáltica en base a riegos de sello. El tener un porcentaje elevado de asfalto en nuestra muestra nos podría disminuir la cantidad de ligante virgen para el diseño de la nueva mezcla.

4.6 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA AL MATERIAL SIN ASFALTO.

TABLA 4.8 Granulometría del material RAP (sin asfalto).

Designación	Abertura (mm)	% Que pasa							
		Muestra 1 Lavado		Muestra 2 Lavado		Muestra 3 Lavado		Muestra 4 Lavado	
		kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
1"	25	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/4"	19	0.000	100.000	0.366	85.413	0.271	89.289	0.340	83.085
1/2"	12.5	0.020	97.872	0.560	63.093	0.442	71.818	0.515	57.463
3/8"	9.5	0.037	93.936	0.546	41.331	0.443	54.308	0.406	37.264
1/4"	6.3	0.550	35.426	0.301	29.334	0.440	36.917	0.309	21.891
No. 4	4.75	0.036	31.596	0.147	23.475	0.130	31.779	0.106	16.617
No. 10	2	0.118	19.043	0.295	11.718	0.456	13.755	0.231	5.124
No. 20	0.85	0.034	15.426	0.084	8.370	0.114	9.249	0.029	3.682
No. 40	0.425	0.066	8.404	0.124	3.428	0.175	2.332	0.048	1.294
No. 60	0.25	0.020	6.277	0.022	2.551	0.025	1.344	0.008	0.896
No. 100	0.15	0.019	4.255	0.029	1.395	0.018	0.632	0.007	0.547
No. 200	0.075	0.020	2.128	0.023	0.478	0.010	0.237	0.006	0.249
charola		0.020	0.000	0.012	0.000	0.006	0.000	0.005	0.000

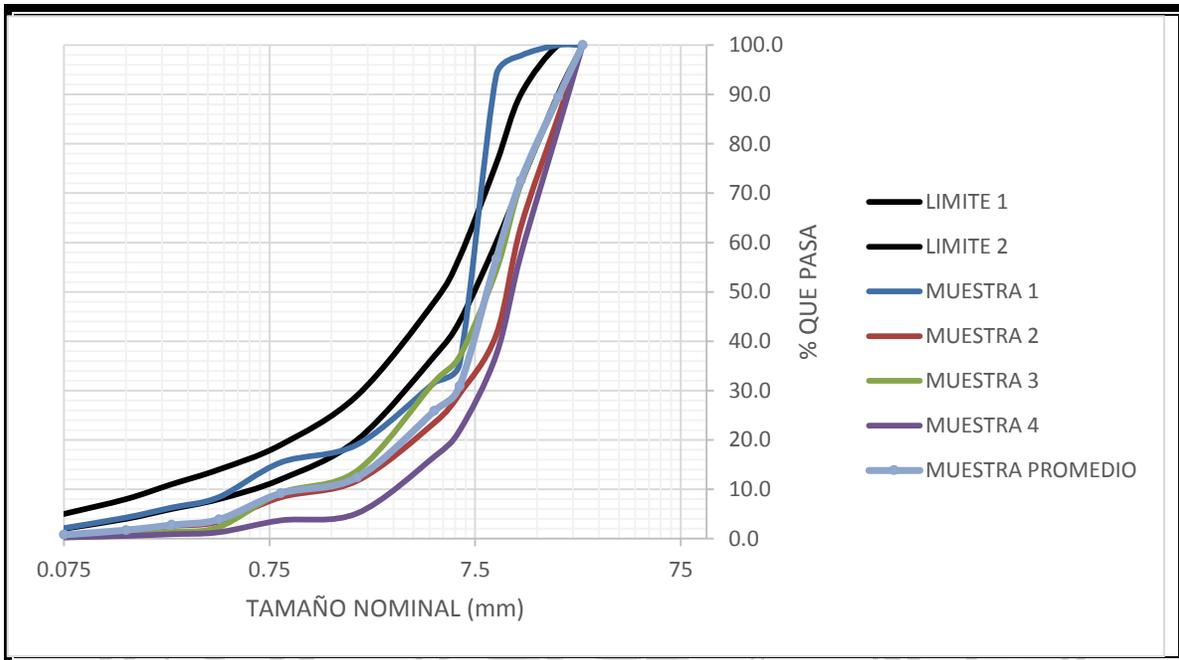


FIG. 4.9 Granulometría del material RAP (sin asfalto).

4.7 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTRICO DE APORTACIÓN.

Dentro de este apartado lo que se pretende es determinar las características de los agregados pétreos que nos permitan establecer sus estándares de calidad y posibles comportamientos de desempeño.

Estos parámetros se obtendrán mediante la realización de las pruebas correspondientes y marcadas por la normativa de diseño Marshall.

4.8 MUESTREO DEL AGREGADO PÉTRICO.

El agregado pétrico analizado para este proyecto de investigación se localiza en el municipio de Acuitzio de Arcángel del estado de Michoacán.

El material es un agregado basáltico producto de trituración.

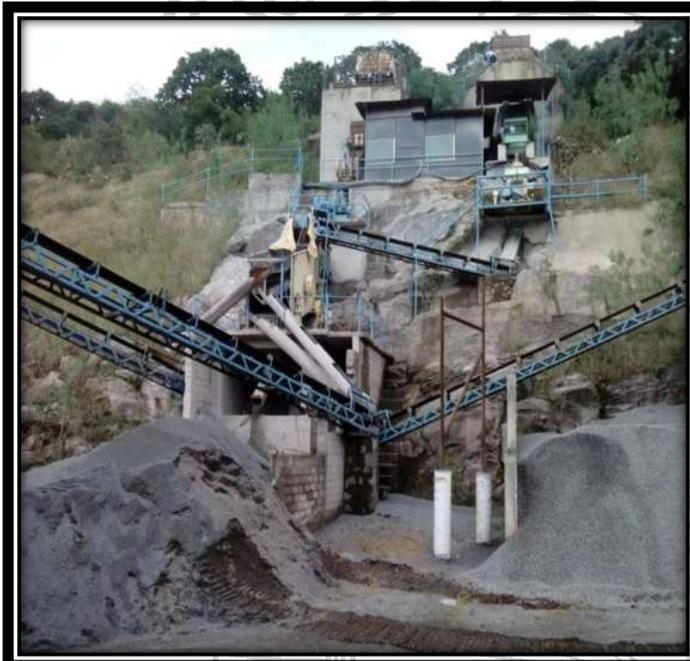


FIG 4.10 Banco de material analizado



4.9 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.

Esta prueba como ya se ha mencionado anteriormente tiene como propósito esencial la determinación de la distribución de los tamaños del agregado.

La importancia de esta prueba es imprescindible dado que el diseño de la nueva mezcla se verá influenciada por los resultados aquí obtenidos.

Dicha prueba se realizó en diferentes apartados, ya que, se analizó el material grueso comprendido por la grava y el sello; y por otra parte el agregado fino.

TABLA 4.11 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Abertura mm	Malla Designación	Tamaño nominal del material pétreo (in)					
		9.5 (³ / ₈)	12.5 (¹ / ₂)	19 (³ / ₄)	25 (1)	37.5 (1 ¹ / ₂)	mm
Porcentaje que pasa							
50	2"						100
37.5	1 ¹ / ₂ "				100		90 - 100
25	1"			100	90 - 100		74 - 90
19	³ / ₄ "		100	90 - 100	79 - 90		62 - 79
12.5	¹ / ₂ "	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71		46 - 60
9.5	³ / ₈ "	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60		39 - 50
6.3	¹ / ₄ "	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46		30 - 39
4.75	N°4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39		25 - 24
2	N°10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24		13 - 21
0.85	N°20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16		6 - 13
0.425	N°40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11		3 - 9
0.25	N°60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9		2 - 7
0.15	N°100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7		1 - 5
0.075	N°200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4		0 - 3



TABLA 4.12 Granulometría del agregado grueso (grava).

Designación	Abertura (mm)	% Que pasa							
		Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4	
		kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
1"	25	0.024	99.347	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/4"	19	1.255	65.216	1.019	62.660	0.748	67.911	1.133	61.993
1/2"	12.5	1.563	22.709	1.198	18.761	0.854	31.274	0.980	29.118
3/8"	9.5	0.654	4.922	0.452	2.199	0.556	7.422	0.693	5.871
1/4"	6.3	0.165	0.435	0.050	0.366	0.148	1.073	0.160	0.503
No. 4	4.75	0.003	0.354	0.001	0.330	0.002	0.987	0.004	0.369
No. 10	2	0.003	0.272	0.001	0.293	0.006	0.729	0.003	0.268
No. 20	0.85	0.000	0.272	0.000	0.293	0.001	0.686	0.002	0.201
No. 40	0.425	0.002	0.218	0.002	0.220	0.004	0.515	0.001	0.168
No. 60	0.25	0.001	0.190	0.001	0.183	0.002	0.429	0.001	0.134
No. 100	0.15	0.001	0.163	0.001	0.147	0.002	0.343	0.001	0.101
No. 200	0.075	0.002	0.109	0.002	0.073	0.002	0.257	0.001	0.067
charola		0.004	0.000	0.002	0.000	0.006	0.000	0.002	0.000

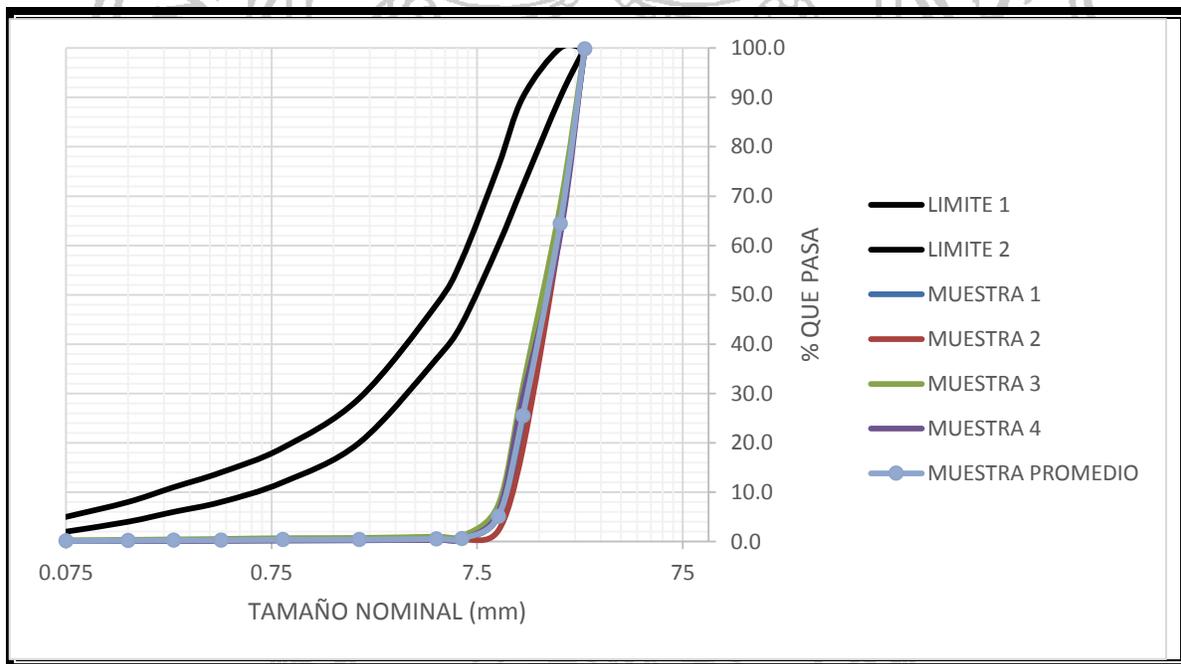


FIG. 4.13 Granulometría del agregado grueso (grava).



TABLA 4.14 Granulometría del agregado grueso (sello).

Designación	Abertura (mm)	Muestra 1		Muestra 2		% Que pasa Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
		kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
1"	25	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/4"	19	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
1/2"	12.5	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/8"	9.5	0.004	99.697	0.026	98.929	0.039	98.375	0.048	97.440	0.023	98.765
1/4"	6.3	0.835	36.391	1.722	27.977	1.763	24.917	1.270	29.707	1.287	29.683
No. 4	4.75	0.418	4.701	0.620	2.431	0.558	1.667	0.499	3.093	0.490	3.382
No. 10	2	0.042	1.516	0.046	0.536	0.033	0.292	0.038	1.067	0.041	1.181
No. 20	0.85	0.001	1.440	0.000	0.536	0.000	0.292	0.000	1.067	0.002	1.074
No. 40	0.425	0.007	0.910	0.002	0.453	0.001	0.250	0.007	0.693	0.000	1.074
No. 60	0.25	0.002	0.758	0.001	0.412	0.000	0.250	0.002	0.587	0.008	0.644
No. 100	0.15	0.002	0.607	0.001	0.371	0.000	0.250	0.002	0.480	0.002	0.537
No. 200	0.075	0.002	0.455	0.001	0.330	0.001	0.208	0.002	0.373	0.002	0.429
charola		0.006	0.000	0.008	0.000	0.005	0.000	0.007	0.000	0.008	0.000

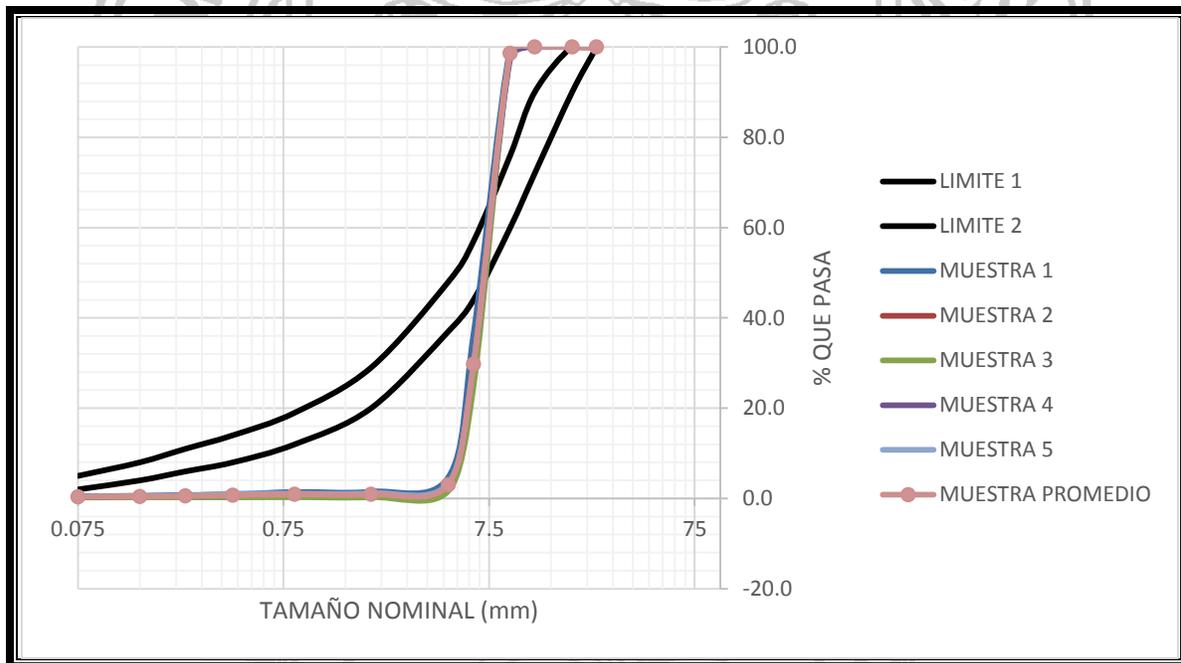


FIG. 4.15 Granulometría del agregado grueso (sello).

TABLA 4.16 Granulometría del agregado fino (arena).



Designación	Abertura (mm)	Muestra 1		Muestra 2		% Que pasa Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
		kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
1"	25	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/4"	19	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
1/2"	12.5	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
3/8"	9.5	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000	0.000	100.000
1/4"	6.3	0.008	99.600	0.010	99.539	0.012	99.512	0.015	99.195	0.014	99.245
No. 4	4.75	0.105	94.350	0.099	94.977	0.119	94.668	0.142	91.577	0.148	91.262
No. 10	2	0.846	52.050	0.890	53.963	1.031	52.707	0.972	39.431	0.965	39.213
No. 20	0.85	0.387	32.700	0.226	43.548	0.229	43.386	0.151	31.330	0.145	31.392
No. 40	0.425	0.208	22.300	0.421	24.147	0.474	24.094	0.309	14.753	0.306	14.887
No. 60	0.25	0.119	16.350	0.133	18.018	0.147	18.112	0.068	11.105	0.072	11.003
No. 100	0.15	0.100	11.350	0.131	11.982	0.144	12.251	0.072	7.242	0.067	7.389
No. 200	0.075	0.102	6.250	0.113	6.774	0.125	7.163	0.057	4.185	0.057	4.315
charola		0.125	0.000	0.147	0.000	0.176	0.000	0.078	0.000	0.080	0.000

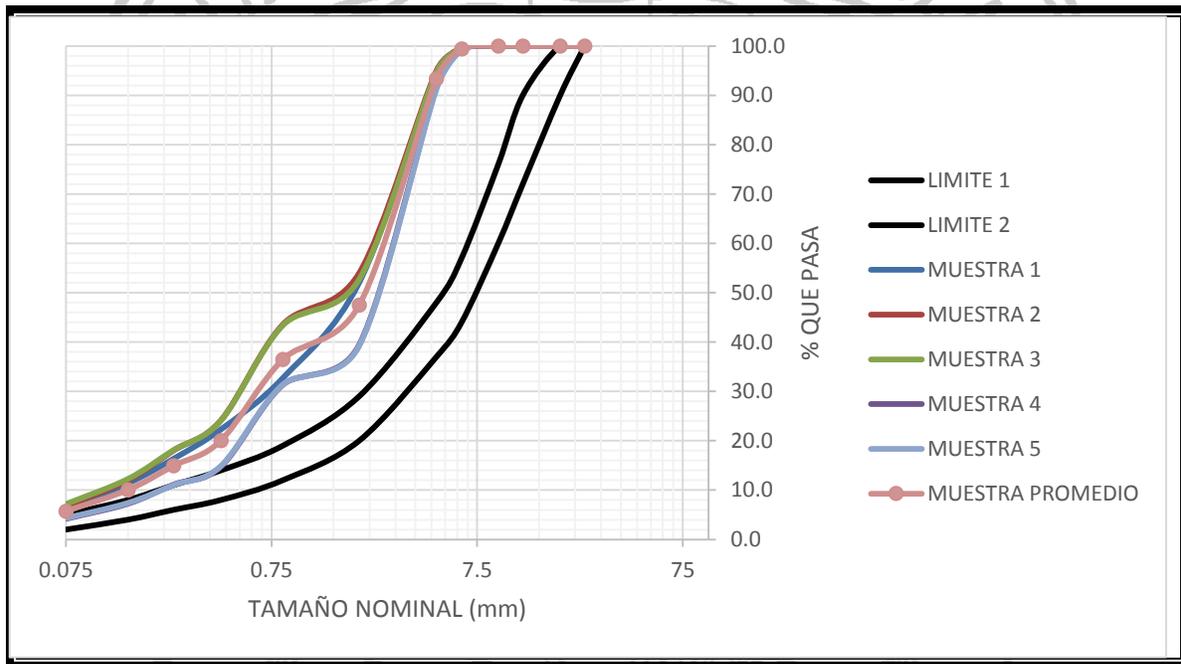


FIG. 4.17 Granulometría del agregado fino (arena).



Como se observa en los resultados de las propiedades granulométricas el material analizado no está cumpliendo con las restricciones de la metodología Marshall. Debido a un proceso de trituración inadecuado.

Esta circunstancia influye de forma directa en el diseño de la nueva mezcla, por lo que es necesario llevar a cabo con los resultados obtenidos en las pruebas de las características granulométricas en los agregados del banco analizado, la propuesta granulométrica para el diseño de la mezcla asfáltica. Dicha propuesta debe cumplir con las especificaciones estipuladas por la metodología de diseño Marshall.

El no tener una granulometría adecuada en la mezcla asfáltica, puede llegar a influir de forma negativa, presentado problemas, tales como: no contar con la cantidad de material fino, esto nos conllevaría a un porcentaje de asfalto elevado en el caso de la presencia de material fino excedente; tener una mezcla de granulometría abierta, es decir, un porcentaje de vacíos mayor al correspondiente al de una mezclas asfáltica densa.

Dadas las circunstancias antes mencionadas, se debe llevar una adecuación de la curva granulométrica del material de aportación, tal que, en combinación con la distribución granulométrica del RAP se obtenga una curva que permita estar dentro de los límites estipulados en la metodología Marshall.

4.10 PRUEBA DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO PÉTREO.

Estas pruebas nos permiten determinar las relaciones masa-volumen de los agregados respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales y se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla de materiales en sus diferentes condiciones de contenidos de agua y el cambio de masa del material debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco; las pruebas se realizan de distinta manera en la fracción del material retenida en la malla N°4 (4,75 mm) y en la porción que pasa dicha malla.

TABLA 4.18 Densidad de arena y grava.

Densidad de Arena				
Muestra	Peso (gr)	Vi (ml)	Vf (ml)	Densidad
1	252	250	345	2.65
2	254.9	250	350	2.55
			Promedio	2.60

Densidad de Grava			
Muestra	Peso (gr)	Vol (ml)	Densidad
1	501.8	180	2.79
2	506.9	194	2.61
		Promedio	2.70



Los resultados obtenidos en esta prueba nos permite observar que el material analizado posee condiciones de absorción positivas, ya que el valor es bajo, esto quiere decir que el material presenta pocos poros y esto nos permitirá que el porcentaje de asfalto sea menor.

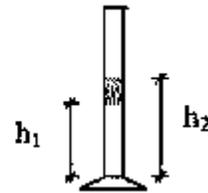
Además se presentan valores de densidad adecuados para determinar que el material analizado es de buena calidad y suponer que el material se comportará de buena manera.

4.11 PRUEBA DE EQUIVALENTE DE ARENA.

Esta prueba se hace con el fin de definir la posible presencia de finos arcillosos en el material fino analizado que pueden influenciar de manera negativa en el desempeño de la mezcla asfáltica.

Nos da un índice representativo de la proporción y características de los finos (arcillas, impurezas, etc.) que contiene un suelo.

$$E. A. = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$



Nos indica la cantidad de arena del agregado pétreo (a mayor porcentaje, mayor cantidad de arena y menor cantidad de finos).

- Los elementos arenosos no floculan y sedimentan.
- Los finos arcillosos floculan y quedan suspendidos en la solución.

TABLA 4.19 Equivalente de arena.

Equivalente de Arena			
Muestra	Lectura Arena	Lectura Arcilla	Equivalente
1	3.3	5.4	61%
5	3.4	5.4	63%
		Promedio	62%

Dados los resultados obtenidos en la prueba, se puede definir que la cantidad de material arcilloso presente en la arena analizada es aceptable haciendo referencia a lo estipulado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la cual marca un valor del 50% como mínimo.



4.12 PRUEBA DE ÍNDICE PLÁSTICO.

El objeto de este ensayo se basa en la determinación en la obtención del límite plástico de un suelo en laboratorio, y el cálculo de índice de plasticidad si se conoce el límite líquido del mismo suelo.

Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelo de aproximadamente 3 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos cilindros se desmoronen.

TABLA 4.20 Índice Plástico.

Límite Líquido					
No.de golpes	Peso cápsula (gr)	Peso Cap. + suelo (gr)	Peso Cap. + Suelo Seco (gr)	Contenido de agua (gr)	Límite Líquido
22	8.31	31.46	27.82	3.64	3.59
Límite Plástico					
Peso cápsula (gr)	Peso Cap. + suelo (gr)	Peso Cap. + Suelo Seco (gr)	Contenido de agua (gr)	Límite Plástico	Índice Plástico
10.15	14.73	13.9	0.83	0.83	2.76

4.13 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO DE APORTACIÓN.

Las características del asfalto, especialmente su consistencia, afectan los resultados de las pruebas de estabilidad, la viscosidad del asfalto entra en juego cuando la aplicación de la carga es muy rápida. en la prueba Marshall, el grado del asfalto tiene un gran efecto en la estabilidad pero muy poco en el índice de flujo.

Dependiendo de su cantidad en la mezcla, el asfalto puede actuar como un ligante o como un lubricante. Por lo tanto, la estabilidad de una mezcla aumenta con un incremento en el porcentaje de asfalto hasta alcanzar un máximo, después del cual disminuye. El efecto del porcentaje de asfalto varía con el tipo de agregado pétreo y en algunos caso es mucho más crítico que en otros.

El asfalto es el material que ejerce mayor influencia en la durabilidad, debido a que la mezcla asfáltica mantendrá su durabilidad, mientras el asfalto mantenga sus propiedades de ligante y de impermeabilizante.

El asfalto, previamente calentado, cubre el agregado mineral con una película delgada; el proceso de calentamiento ocasiona en el asfalto oxidación y endurecimiento. El endurecimiento se mide por la disminución del valor de la penetración. El endurecimiento puede ser producido por las propiedades del asfalto, por la temperatura de mezcla, por la cantidad de asfalto en la mezcla, y por la densidad del pavimento.



4.14 PENETRACIÓN.

La penetración en los asfaltos se define como la distancia, expresada en decimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.

Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gramos, aunque se pueden emplear otras condiciones previamente definidas.

El ensayo de penetración en los asfaltos se usa como una medida de consistencia. altos valores de penetración indicarán consistencias más blandas.

El aparato para la medida de las penetraciones se denomina penetrómetro y en esencia está constituido por un mecanismo que permita el movimiento vertical sin rozamiento apreciable de un vástago o soporte móvil al cual se pueda fijar firmemente por su parte inferior, la aguja de penetración; y que permita, además, la colocación sobre el mismo, de diferentes cargas suplementarias; el aparato deberá estar debidamente calibrado para dar directamente la lectura en unidades de penetración y debe ser capaz de indicar la profundidad de penetración con una aproximación de 0.1 mm.

La masa del vástago será de 47.5 ± 0.05 g, y la masa total del conjunto móvil formado por el vástago juntamente con la aguja, de 50.0 ± 0.05 g.

El penetrómetro deberá estar provisto, además, de una base de apoyo para la colocación del recipiente con la muestra, de forma plana y que forme un ángulo de 90° con respecto al sistema móvil, así como un nivel de burbuja y tornillos de nivelación.

El tener un asfalto con altos valores de penetración, nos indica que el ligante es un material blando, lo cual nos puede proporcionar características negativas en cuanto a deformaciones de la mezcla asfáltica, ocasionadas por las cargas vehiculares o temperaturas elevadas.

TABLA 4.21 Requisitos de penetración para cemento asfáltico. Fuente N-CMT-4-05-001

Característica	Clasificación		
	AC-5	AC-10	AC-20
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60

4.15 DUCTILIDAD.

El ensayo de ductilidad fue desarrollado por Dow en 1903, propuesto como método tentativo de la ASTM, en 1921 y aceptado como método estándar, por dicha institución en 1935.



Sus resultados dependen de una serie de propiedades del asfalto como son: la consistencia, la cohesión, el comportamiento reológico, etc. pero no mide ninguna de estas como tal específicamente.

En general la ductilidad de los asfaltos obtenidos por destilación de crudos adecuados es tan elevada, que la rotura de las estructuras en las que el asfalto interviene como ligante se produce antes por fallo de la ductilidad.

El ensayo de ductilidad da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de un producto asfáltico puede alargarse antes de romperse.

Este ensayo se realiza con una briqueta moldeada del material que se va a probar, traccionando las dos extremidades de la briqueta a una velocidad de 5 ± 0.25 cm. por minuto y a una temperatura de $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

4.16 DISEÑO DE PASTILLAS MARSHALL.

El diseño y fabricación de los especímenes de prueba se realizaron con diferentes contenidos de asfalto de aportación y de porcentaje de RAP.

Desde un 4.5 hasta un 6.5% (aumentando 0.5%) de asfalto, así como 0, 10, 30 y 50% de RAP.

Esto con el fin de obtener una correcta correlación del comportamiento de las mezclas asfálticas con incorporación de RAP.

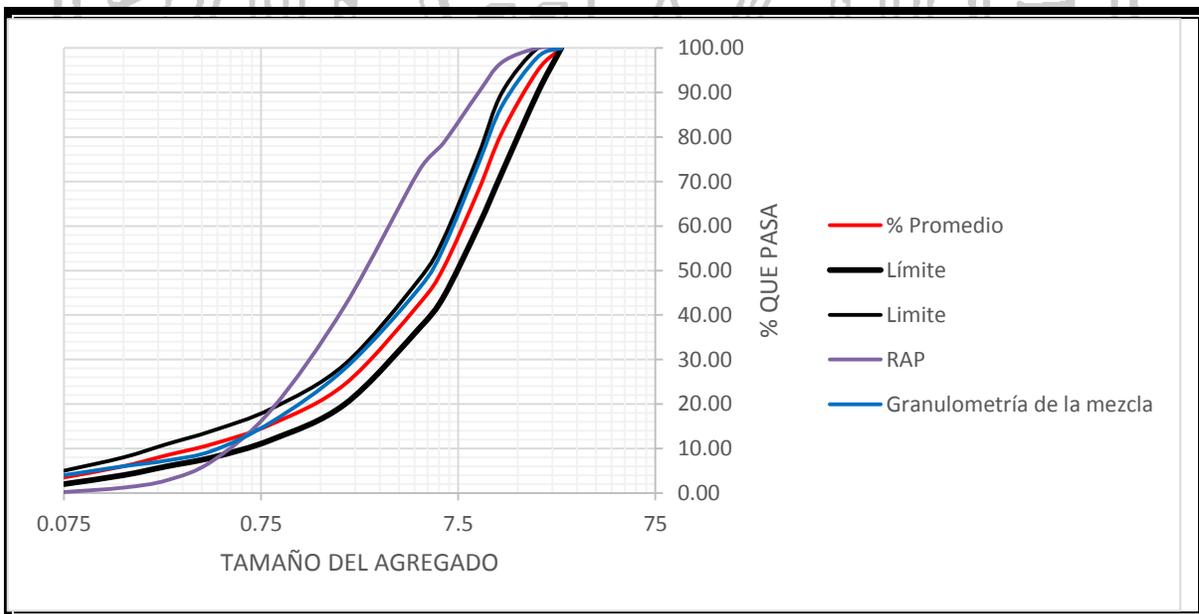


FIG. 4.22 Granulometría para diseño de pastillas Marshall.

4.17 PRUEBAS A LA MEZCLA ASFÁLTICA.

En el método Marshall se realizan tres pruebas a la mezcla asfáltica compactada para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

Cada una de ellas son de suma importancia ya que nos brindaran parámetros que nos indicarán el posible comportamiento de la mezcla asfáltica.



FIG. 4.23 Máquina automatizada Marshall.

4.18 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado después del proceso de curado. esta prueba se desarrolla de acuerdo con la norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando parafina; o ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas sobre especímenes secos.

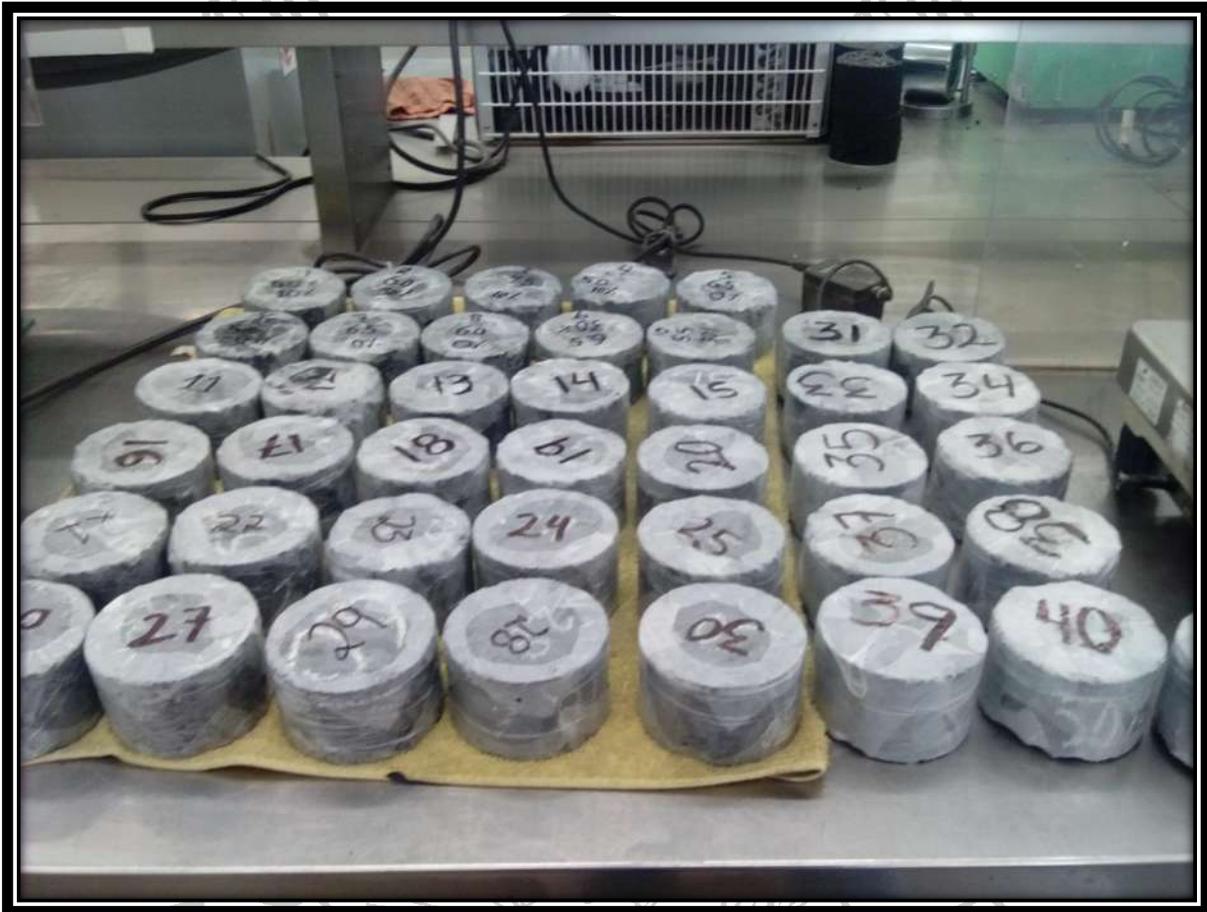


FIG. 4.24 Especímenes Acondicionados con Parafim



TABLA 4.25 Resultados de la Prueba de Gravedad Específica para las Mezclas con 0% RAP

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-5 Y 0% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	1,038.80	1,034.10	529.70	6.23	1.04	3.98
	2	4.50	1,034.10	1,029.20	534.00	6.19	1.04	2.89
	3	4.50	1,037.00	1,030.10	539.70	6.09	1.09	3.47
B	1	5.00	1,043.50	1,038.00	538.10	6.22	1.04	3.95
	2	5.00	1,043.30	1,038.60	542.00	6.22	1.04	3.66
	3	5.00	1,043.10	1,038.10	539.70	6.17	1.04	3.15
C	1	5.50	1,046.20	1,041.30	535.40	6.32	1.00	3.35
	2	5.50	1,052.20	1,047.60	556.60	6.10	1.04	4.31
	3	5.50	1,058.40	1,053.70	551.20	6.24	1.04	3.53
D	1	6.00	1,053.70	1,046.60	549.90	6.19	1.04	3.95
	2	6.00	1,056.50	1,051.10	552.10	6.17	1.04	4.12
	3	6.00	1,059.10	1,054.40	559.30	6.16	1.04	5.21
E	1	6.50	1,054.50	1,048.40	550.40	6.19	1.04	4.00
	2	6.50	1,064.00	1,059.10	572.60	6.22	1.04	4.10
	3	6.50	1,043.50	1,038.60	547.70	6.17	1.04	4.19

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-20 Y 0% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	1,045.60	1,041.80	528.20	6.45	0.96	2.91
	2	4.50	1,045.80	1,041.00	537.20	6.27	1.04	0.70
	3	4.50	1,037.10	1,031.50	511.40	6.51	0.96	3.87
B	1	5.00	1,048.10	1,043.20	514.10	6.61	0.92	3.85
	2	5.00	1,038.80	1,034.50	525.80	6.36	1.00	2.74
	3	5.00	1,044.80	1,040.10	528.10	6.37	1.00	3.94
C	1	5.50	1,041.60	1,036.60	521.40	6.51	0.96	5.24
	2	5.50	1,048.70	1,044.00	519.80	6.51	0.96	3.84
	3	5.50	1,049.70	1,044.90	533.30	6.25	1.04	4.06
D	1	6.00	1,043.00	1,038.30	543.60	6.17	1.04	4.06
	2	6.00	1,049.70	1,044.60	533.70	6.43	0.96	3.79
	3	6.00	1,057.00	1,051.90	542.60	6.39	1.00	4.47
E	1	6.50	1,044.10	1,039.20	545.00	6.17	1.04	7.68
	2	6.50	1,023.40	1,019.90	509.70	6.51	0.96	4.51
	3	6.50	1,053.40	1,048.60	525.10	6.56	0.96	4.16



TABLA 4.26 Resultados de la Prueba de Gravedad Específica para las Mezclas con 10% RAP

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-5 Y 10% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	1,023.60	1,019.20	507.90	6.40	1.00	3.09
	2	4.50	1,036.30	1,031.50	524.50	6.27	1.04	4.16
	3	4.50	1,038.00	1,033.40	512.10	6.56	0.96	3.28
B	1	5.00	1,037.20	1,032.40	521.30	6.26	1.04	3.02
	2	5.00	1,041.10	1,036.20	529.80	6.64	0.92	3.27
	3	5.00	1,083.70	1,078.90	540.10	6.84	0.89	2.74
C	1	5.50	1,036.50	1,031.60	535.30	6.10	1.09	3.47
	2	5.50	1,042.00	1,037.20	522.00	6.31	1.00	3.25
	3	5.50	1,043.90	1,039.20	546.10	6.11	1.04	3.62
D	1	6.00	1,043.30	1,038.20	544.50	6.12	1.04	4.86
	2	6.00	1,044.60	1,039.50	536.80	6.27	1.04	5.08
	3	6.00	1,053.30	1,048.40	550.20	6.19	1.04	3.18
E	1	6.50	1,046.30	1,041.70	549.40	6.11	1.04	4.42
	2	6.50	1,051.60	1,047.00	551.10	6.11	1.04	5.14
	3	6.50	1,052.60	1,048.50	556.20	6.08	1.09	3.06

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-20 Y 10% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	1,030.50	1,025.90	512.00	6.42	0.96	4.73
	2	4.50	1,017.20	1,011.80	483.10	6.65	0.92	2.68
	3	4.50	1,039.30	1,034.40	515.80	6.45	0.96	3.66
B	1	5.00	1,025.80	1,020.60	510.40	6.51	0.96	2.72
	2	5.00	1,041.30	1,036.30	514.60	6.59	0.96	3.38
	3	5.00	1,036.20	1,031.70	516.30	6.45	0.96	3.40
C	1	5.50	1,038.80	1,033.80	524.60	6.31	1.00	3.87
	2	5.50	1,041.50	1,036.70	534.40	6.27	1.04	3.84
	3	5.50	1,042.90	1,038.70	507.50	6.68	0.92	3.34
D	1	6.00	1,054.60	1,047.70	538.10	6.37	1.00	3.76
	2	6.00	1,050.70	1,045.90	539.30	6.33	1.00	3.91
	3	6.00	1,049.60	1,044.70	509.10	6.68	0.92	3.43
E	1	6.50	1,052.20	1,047.10	535.40	6.40	1.00	4.39
	2	6.50						
	3	6.50	1,060.30	1,056.30	540.70	6.43	1.00	3.90



TABLA 4.27 Resultados de la Prueba de Gravedad Específica para las Mezclas con 30% RAP

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-5 Y 30% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	975.80	971.80	462.30	6.42	1.00	2.91
	2	4.50	957.60	953.00	439.50	6.57	0.96	3.06
	3	4.50	993.00	988.80	466.50	6.52	0.96	3.09
B	1	5.00	999.50	995.00	479.20	6.48	0.96	2.58
	2	5.00	1,005.00	1,000.40	477.90	6.53	0.96	3.43
	3	5.00	1,005.50	999.50	483.80	6.44	0.96	3.25
C	1	5.50	1,015.20	1,010.40	501.30	6.39	1.00	3.37
	2	5.50	1,019.30	1,014.50	509.60	6.26	1.04	2.91
	3	5.50	1,012.60	1,008.10	494.00	6.43	0.96	3.71
D	1	6.00	1,023.00	1,017.30	512.70	6.27	1.04	3.56
	2	6.00	1,029.10	1,024.30	522.10	6.26	1.04	3.41
	3	6.00	1,020.20	1,015.30	508.80	6.36	1.00	3.21
E	1	6.50	939.70	933.60	479.80	5.61	1.25	3.08
	2	6.50	1,027.90	1,022.90	515.50	6.27	1.04	4.09
	3	6.50	1,021.80	1,017.10	518.20	6.16	1.04	3.32

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-20 Y 30% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	946.60	942.20	427.70	6.66	0.92	3.62
	2	4.50	920.60	918.70	531.40	6.48	0.96	1.65
	3	4.50	957.70	952.90	446.80	6.42	0.96	3.08
B	1	5.00	988.70	984.80	494.80	6.66	0.92	2.97
	2	5.00	1,002.20	997.20	472.00	6.45	1.00	2.39
	3	5.00	997.50	991.60	479.20	6.40	1.00	3.06
C	1	5.50	1,006.90	1,002.40	490.20	6.37	1.00	3.12
	2	5.50	1,015.60	1,010.80	488.50	6.52	0.96	3.21
	3	5.50	1,007.40	1,002.70	487.40	6.44	0.96	3.38
D	1	6.00	1,017.70	1,013.50	505.60	6.36	1.00	3.43
	2	6.00	1,025.00	1,019.70	498.60	6.52	0.96	3.85
	3	6.00	1,031.00	1,026.30	506.70	6.47	1.00	3.38
E	1	6.50	1,038.60	1,034.10	532.60	6.37	1.00	4.69
	2	6.50	1,028.00	1,023.00	507.20	6.43	1.00	4.19
	3	6.50	1,034.90	1,029.90	514.20	6.44	1.00	3.52



TABLA 4.28 Resultados de la Prueba de Gravedad Específica para las Mezclas con 50% RAP

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-5 Y 50% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	891.30	886.90	376.60	6.75	0.89	1.98
	2	4.50	869.80	867.00	381.90	6.55	0.96	1.80
	3	4.50	930.20	926.10	429.00	6.51	0.96	4.48
B	1	5.00	843.90	840.20	421.00	6.58	0.96	2.70
	2	5.00	755.70	752.20	320.30	6.43	0.96	2.07
	3	5.00	715.40	713.00	293.70	6.77	0.89	
C	1	5.50	905.70	901.40	398.00	6.57	0.96	3.49
	2	5.50	888.40	883.20	383.50	6.51	0.96	4.04
	3	5.50	900.50	897.30	390.40	6.73	0.92	3.11
D	1	6.00	983.90	979.20	467.20	6.39	1.00	3.35
	2	6.00	901.50	897.00	433.20	5.84	1.14	2.24
	3	6.00	985.40	981.40	481.30	6.25	1.04	3.57
E	1	6.50	1,004.70	1,000.10	486.60	6.36	1.00	3.47
	2	6.50	1,004.40	999.50	475.70	6.56	0.96	2.77
	3	6.50	989.90	985.30	452.30	6.71	0.92	3.94

DATOS DE LA MEZCLA CON AC-20 Y 50% RAP								
ENSAYE	PROBETA	% C.A. CALCULADO	Especimen + parafina en aire	Especimen sin parafina en aire	Especimen + parafina en agua	Altura del Especimen (cms)	Factor de Corrección	Flujo en mm
A	1	4.50	905.80	900.80	383.90	6.72	0.89	2.62
	2	4.50	957.60	953.20	441.70	6.41	0.96	3.53
	3	4.50	936.20	930.20	408.60	6.72	0.92	3.30
B	1	5.00	971.70	966.80	454.30	6.39	1.00	3.59
	2	5.00	946.80	942.20	424.50	6.54	0.96	2.56
	3	5.00	948.60	944.10	435.00	6.47	0.96	3.19
C	1	5.50	984.20	979.30	465.40	6.44	0.96	3.15
	2	5.50	984.90	980.20	465.00	6.48	0.96	3.68
	3	5.50	961.40	957.20	479.30	6.70	0.92	7.50
D	1	6.00	997.60	993.30	466.40	6.61	0.92	3.28
	2	6.00	983.70	979.30	453.70	6.51	0.96	2.58
	3	6.00	982.60	978.10	458.10	6.53	0.96	2.83
E	1	6.50	1,001.80	996.90	471.20	6.59	0.96	3.78
	2	6.50	1,002.50	997.90	471.90	6.60	0.92	3.56
	3	6.50	1,002.00	997.50	474.50	6.49	0.96	10.65



4.19 PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO.

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas derivadas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura aun sometido bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras señales que indican cambios en el comportamiento de la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen de las cargas vehiculares esperadas. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de los que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial de la partícula. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre mas angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera su textura superficial, más alta será su estabilidad de la mezcla.

El flujo propiamente es medido en centésimas de pulgada, lo cual representa la deformación de la muestra. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la muestra.

Las mezclas que contienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. En caso contrario aquellas mezclas que presentan valores altos de fluencia se consideran demasiado plásticas y tienen la tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas vehiculares.

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño maría a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba preparado, se removerá el espécimen de prueba del baño maría y cuidadosamente será secado superficialmente. Posteriormente se colocará y centrará en la mordaza inferior, se procede a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el equipo de carga.

En seguida se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta que se presente la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como valor de estabilidad Marshall.



Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100") será el valor de flujo Marshall.

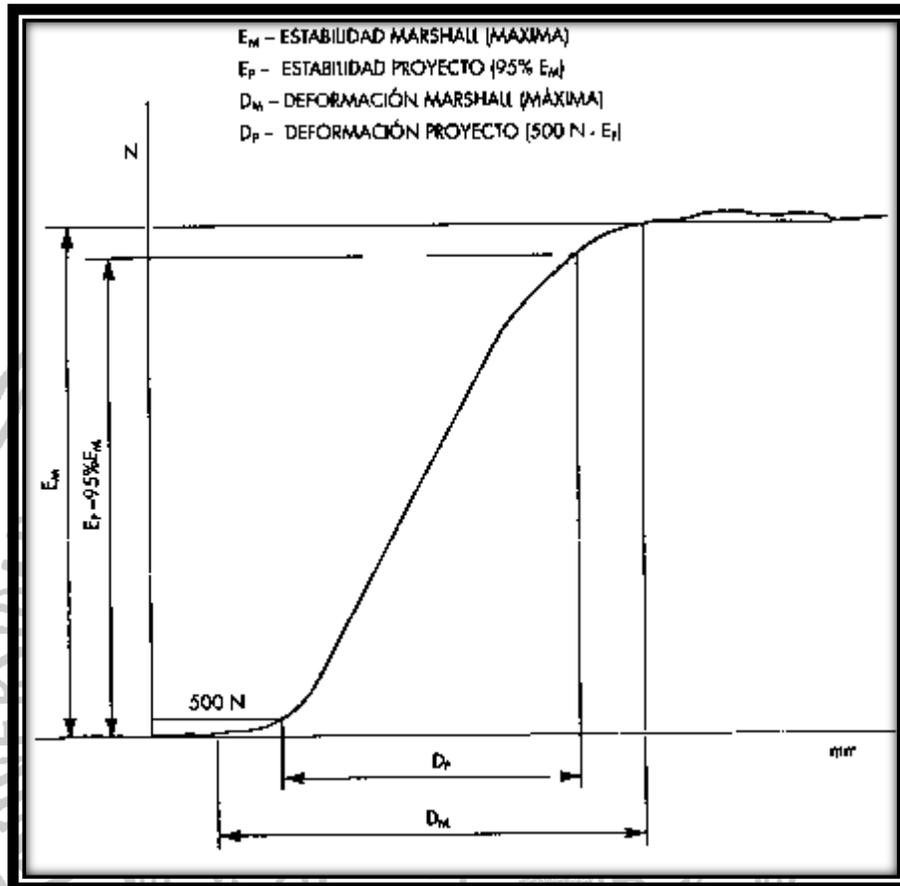


FIG. 4.29 Diagrama Marshall

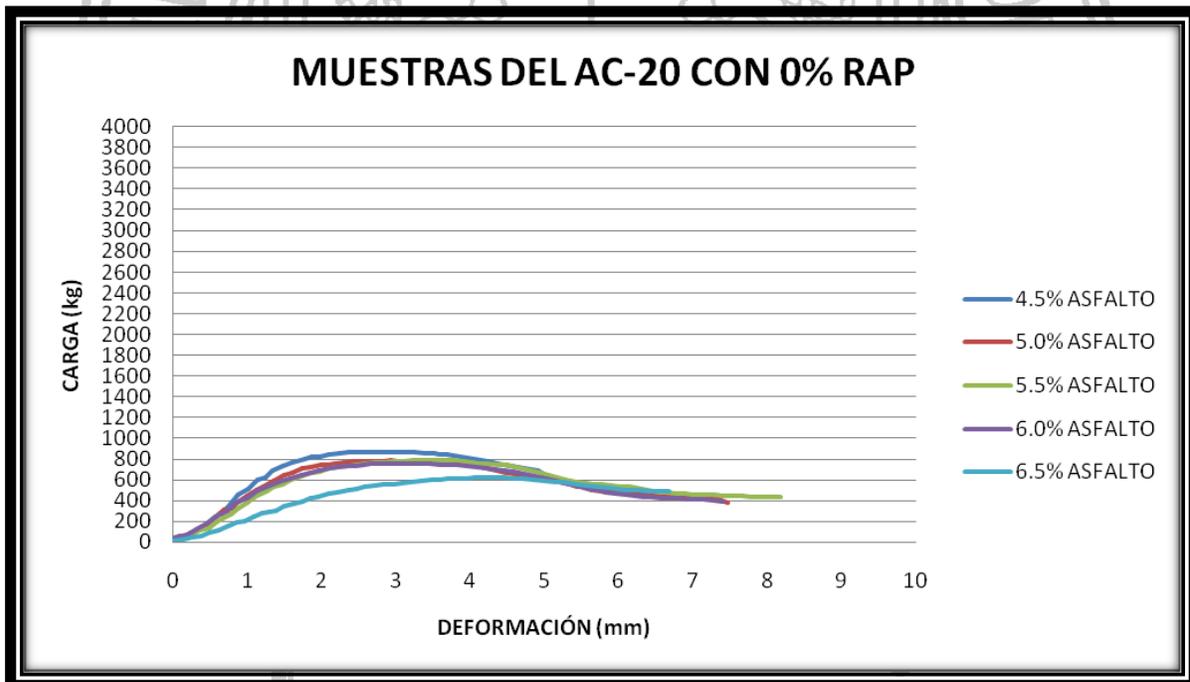
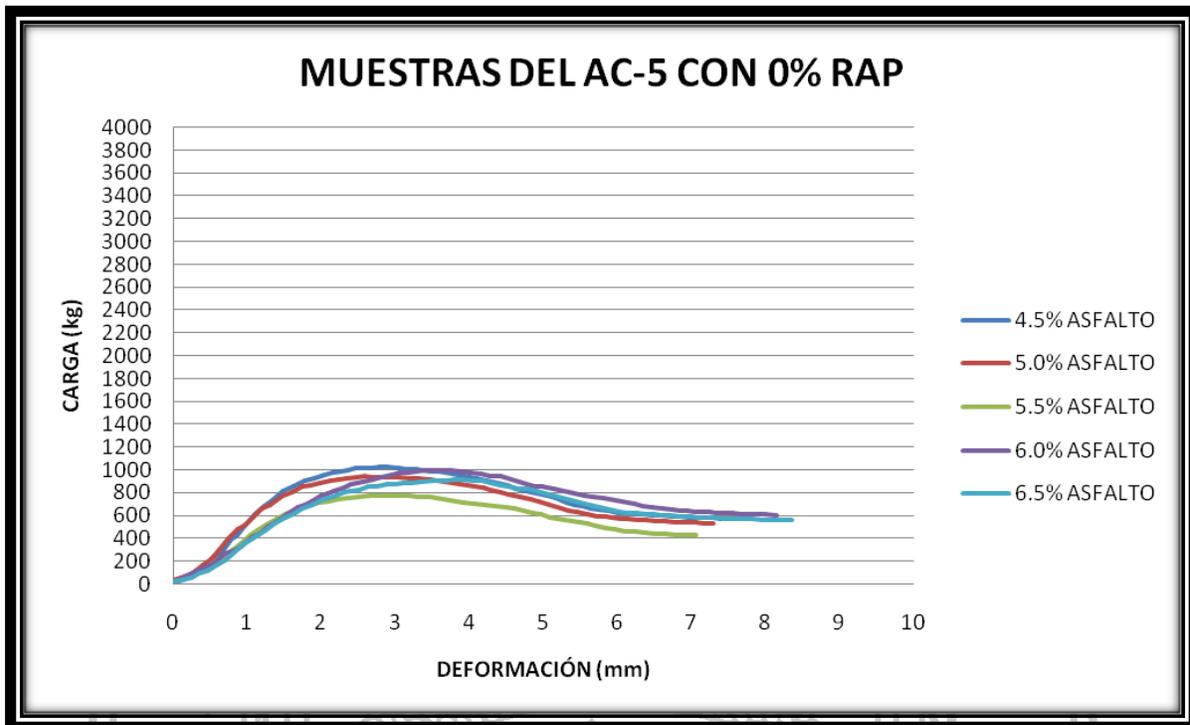


FIG. 4.30 Pastillas de Estabilidad Marshall con 0% RAP.

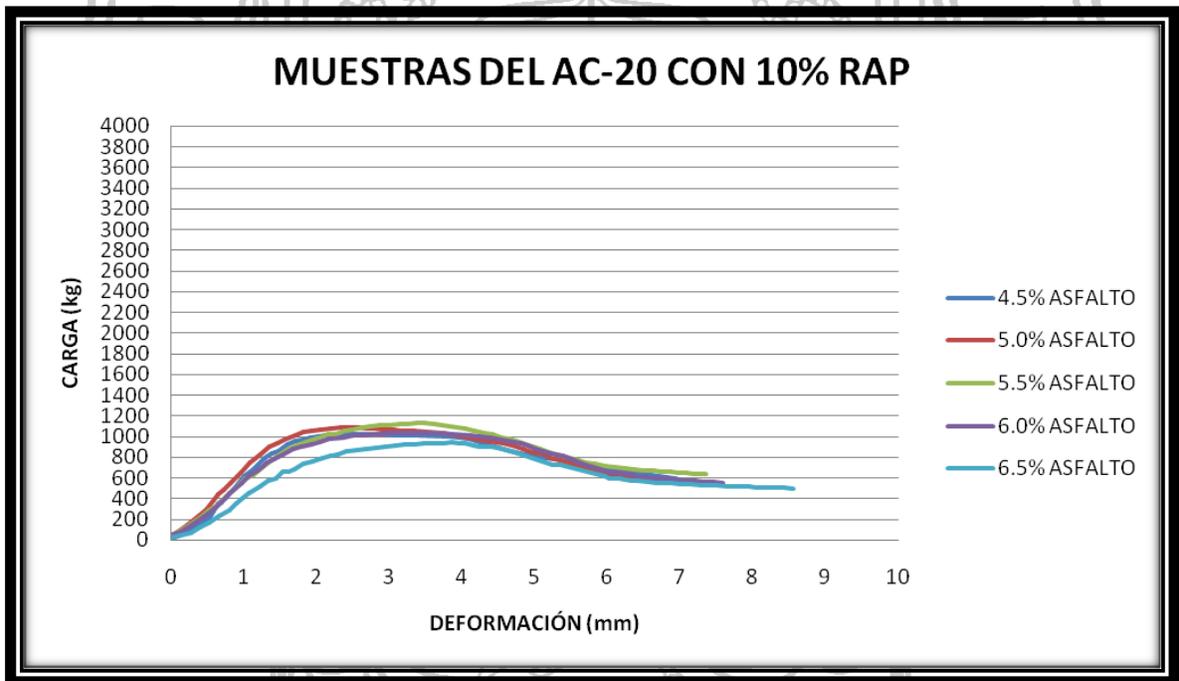
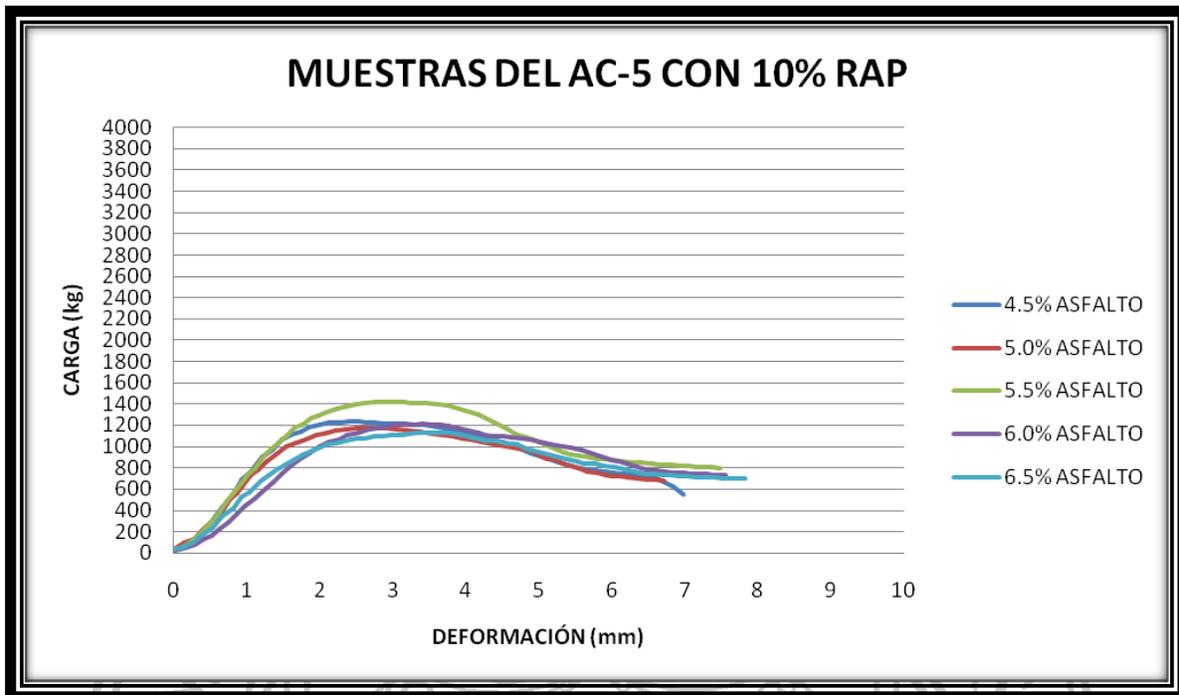


FIG. 4.31 Pastillas de Estabilidad Marshall con 10% RAP.

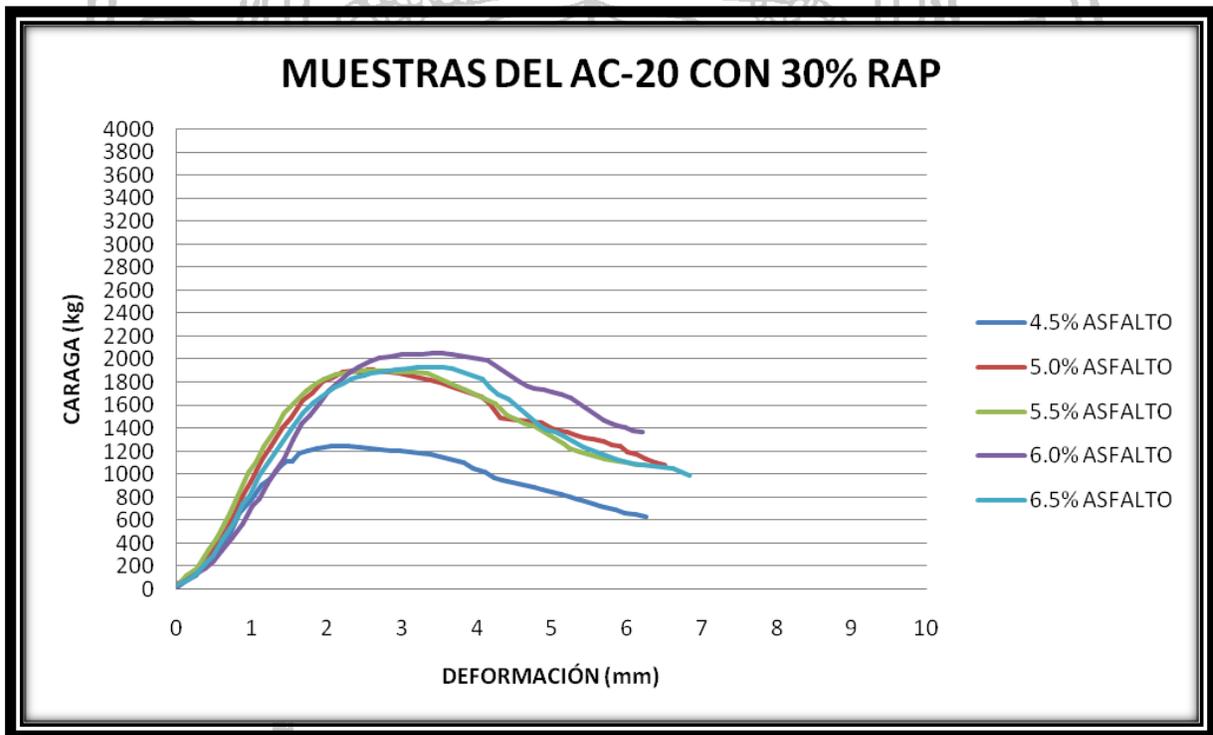
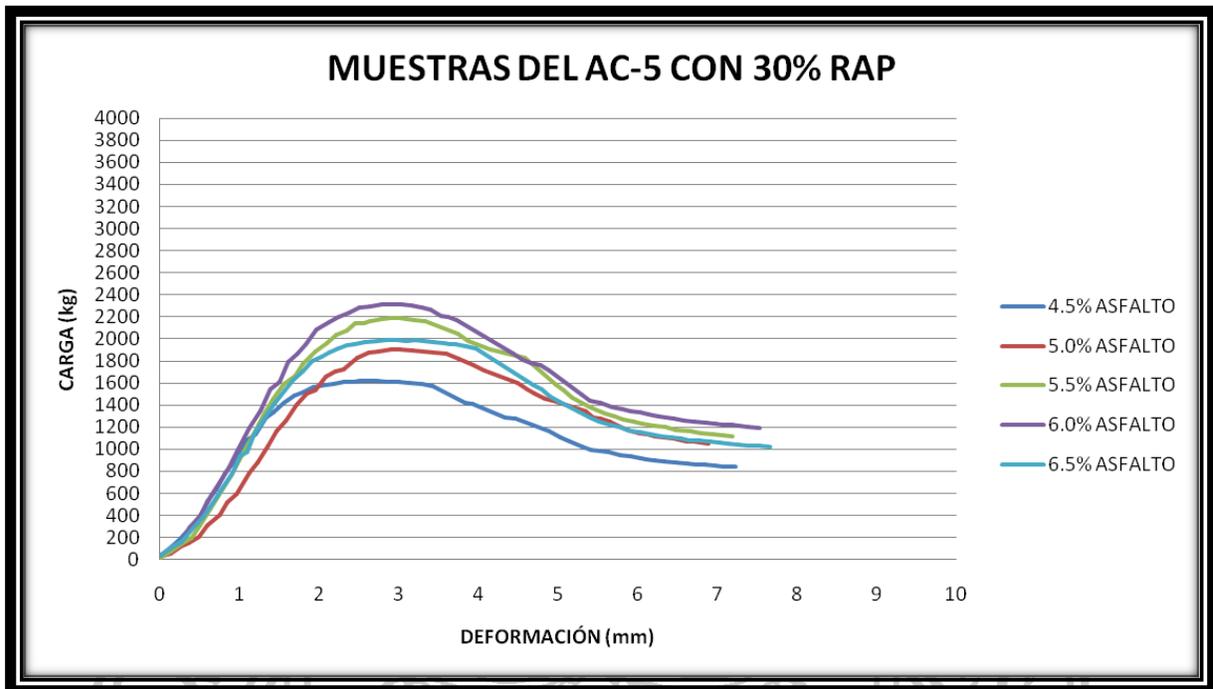


FIG. 4.32 Pastillas de Estabilidad Marshall con 30% RAP.

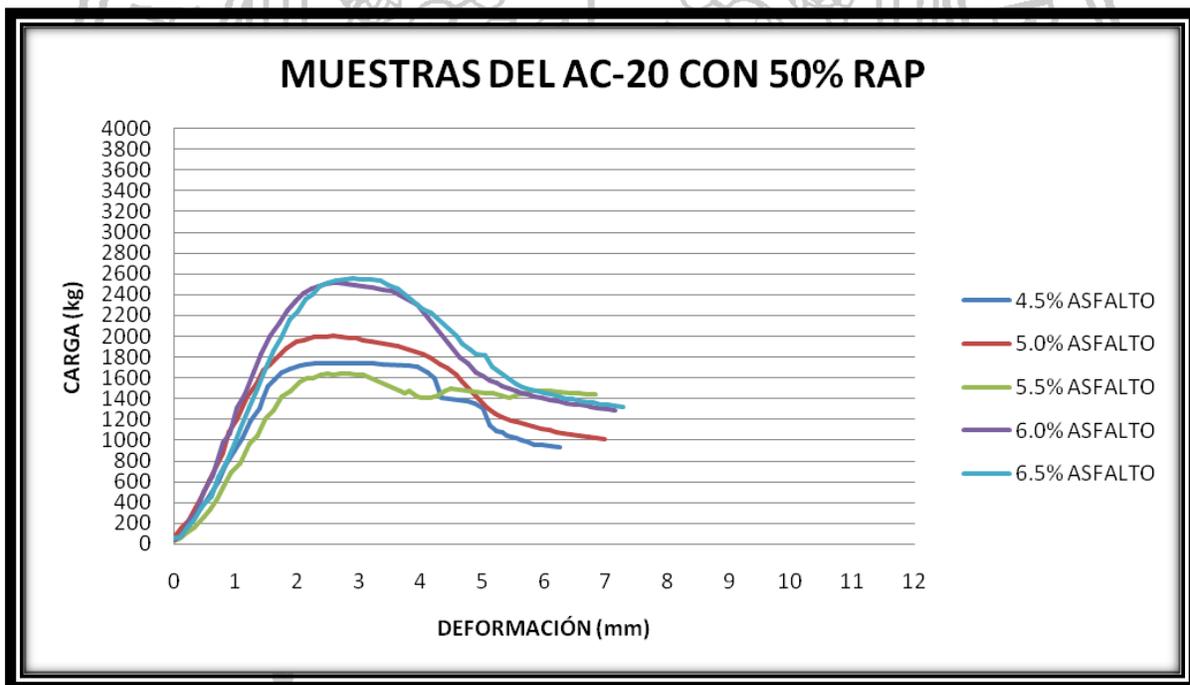
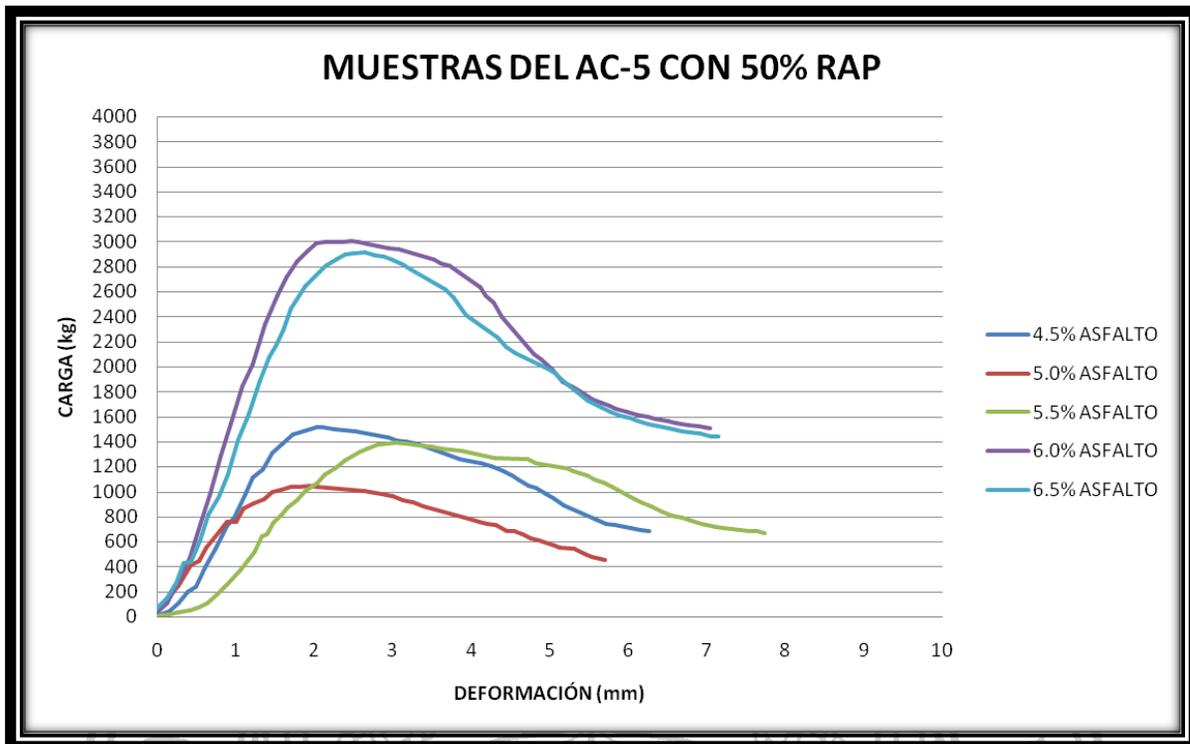


FIG. 4.33 Pastillas de Estabilidad Marshall con 30% RAP.

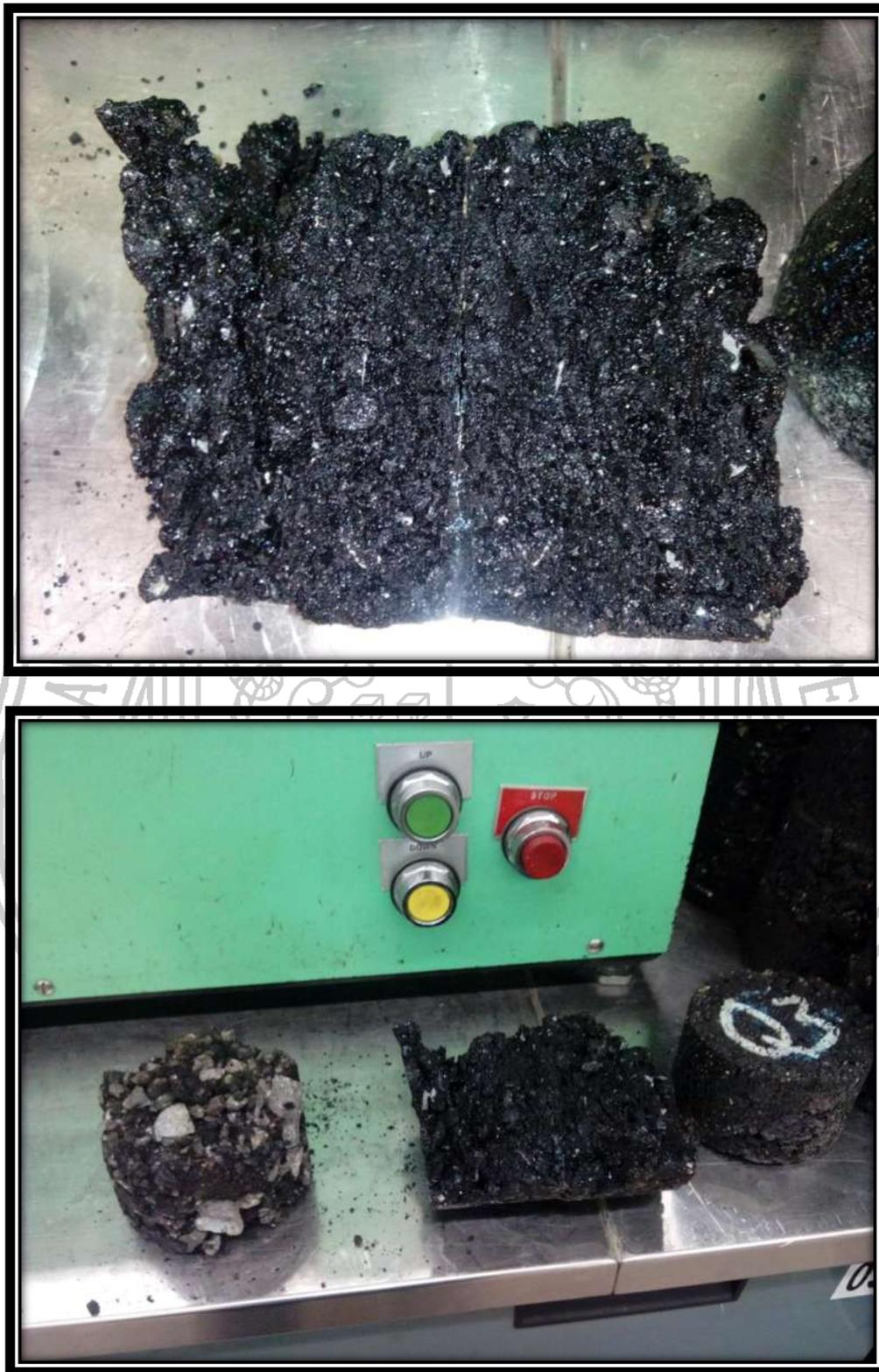


FIG. 4.34 Pastillas de Estabilidad Marshall ensayadas.



Con los resultados definidos en las gráficas antes mostradas, se pueden analizar las características de cada una de las mezclas con diferentes porcentajes de RAP, donde se logra observar una capacidad de carga mayor conforme se incorpora mas RAP a las mezclas asfálticas.

Así mismo se puede observar que de acuerdo con los diferentes valores del porcentaje de asfalto de aportación a la mezclas asfáltica, el de mejor comportamiento en cuanto a la carga de estabilidad Marshall es el de 6.0% de asfalto aun por encima del comportamiento mostrado de los especímenes con 6.5% de asfalto.

Este comportamiento antes mencionado se presenta dado que el valor del flujo en las muestras con el 6.5% de asfalto aumenta y esto provoca que el desempeño de la mezcla asfáltica a la carga soportada sea menor que el mostrado en los especímenes del 6.0% de asfalto, no obstante esto no quiere decir que entre menos asfalto de aportación y mayor cantidad de RAP en la mezcla esta vaya a presentar un mejor comportamiento, ya que esto provocaría problemas como: cubrimiento del agregado pétreo deficiente, lo cual conllevaría a la presencia de posibles desprendimientos y darle a la mezcla una mayor susceptibilidad a la humedad.

4.20 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACIOS.

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca de contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica del asfalto y a gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

4.21 MÓDULO MARSHALL

Con la obtención de los valores que definen la estabilidad Marshall y la deformación, se puede proceder a definir el módulo Marshall, el cual es resultado de realizar la división de la estabilidad entre la deformación.

El módulo Marshall o módulo de rigidez de una mezcla asfáltica en caliente nos permite observar precisamente el comportamiento de dichas mezclas con los diferentes porcentajes tanto de RAP como de asfalto de aportación.

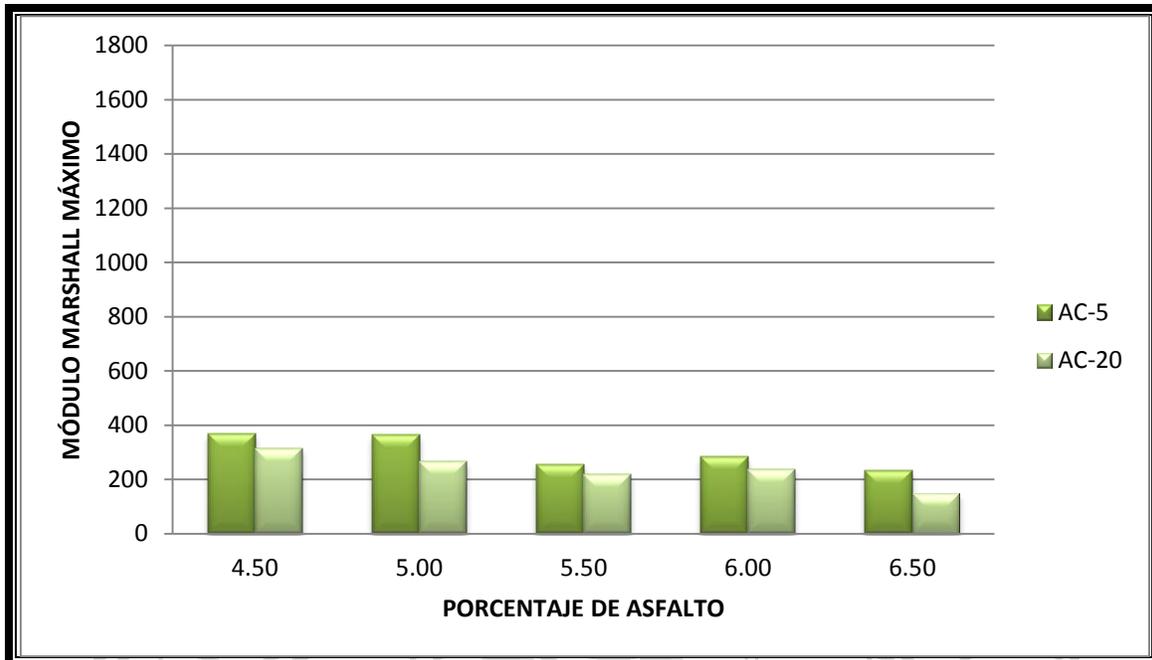


FIG. 4.35 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall Máximo para las Mezclas con 0% RAP.

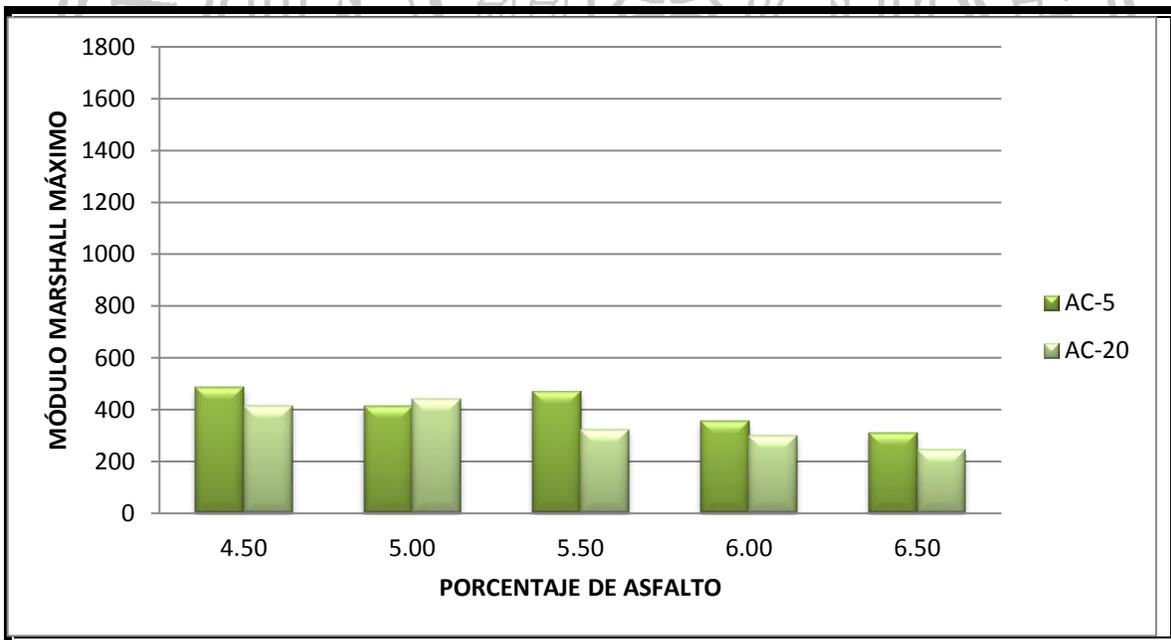


FIG. 4.36 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall Máximo para las Mezclas con 10% RAP.

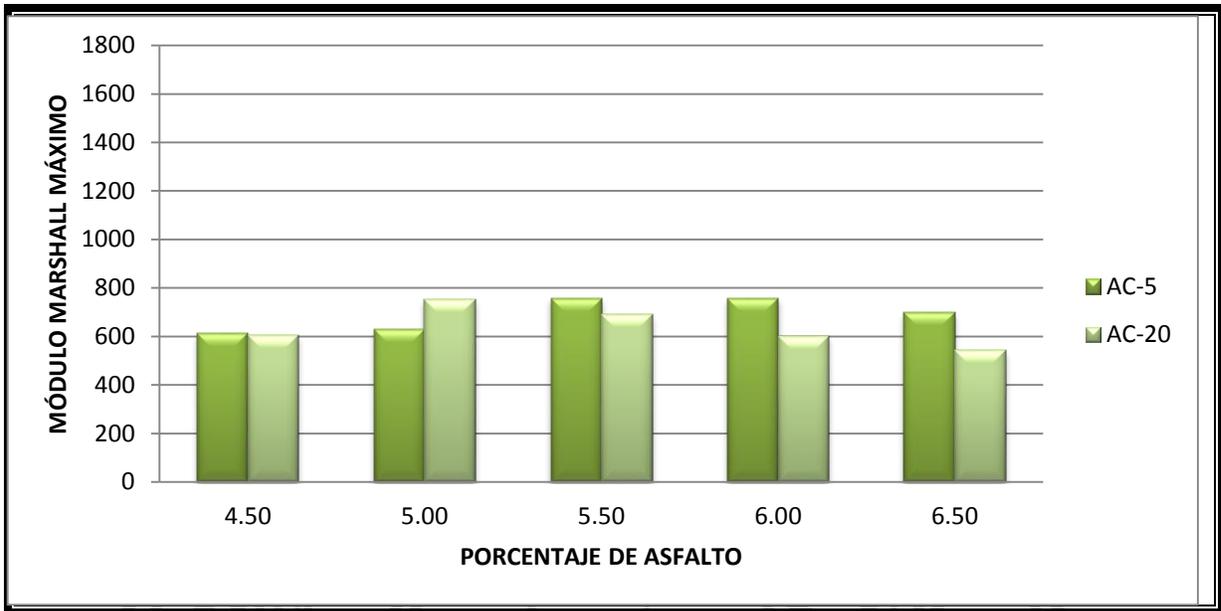


FIG. 4.37 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall Máximo para las Mezclas con 30% RAP.

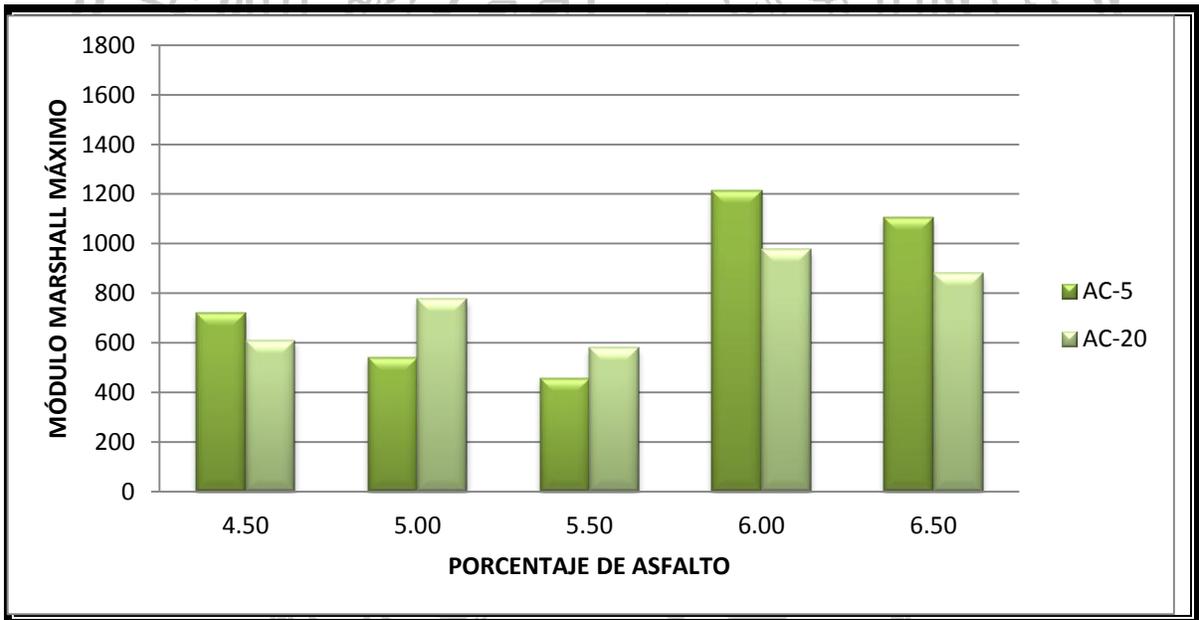


FIG. 4.38 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall Máximo para las Mezclas con 50% RAP.

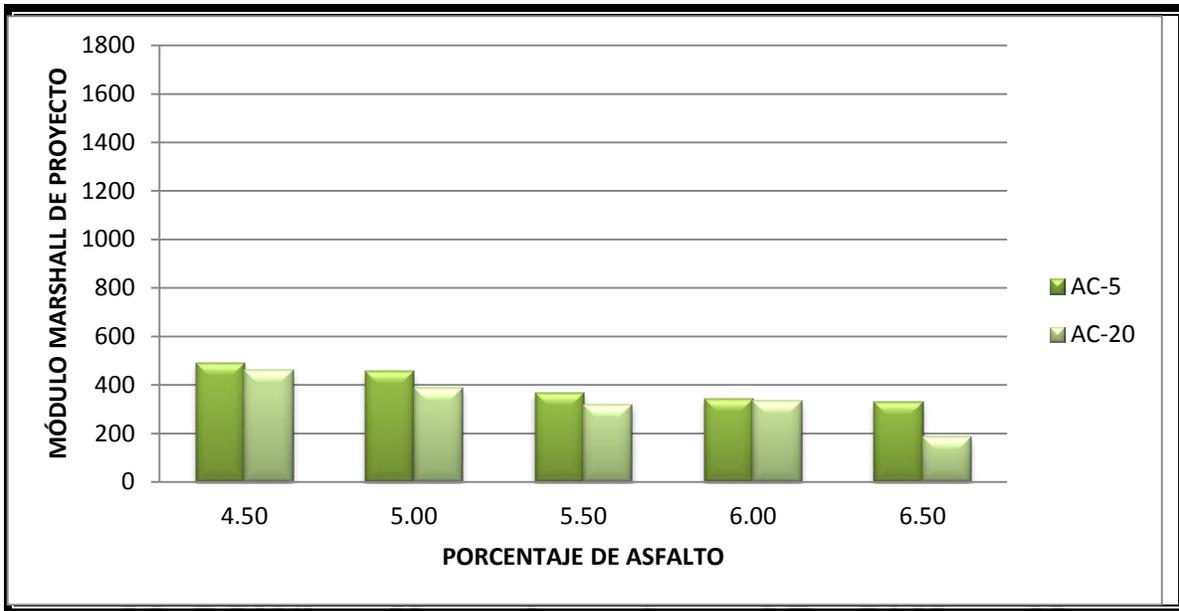


FIG. 4.39 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall de Proyecto para las Mezclas con 0% RAP.

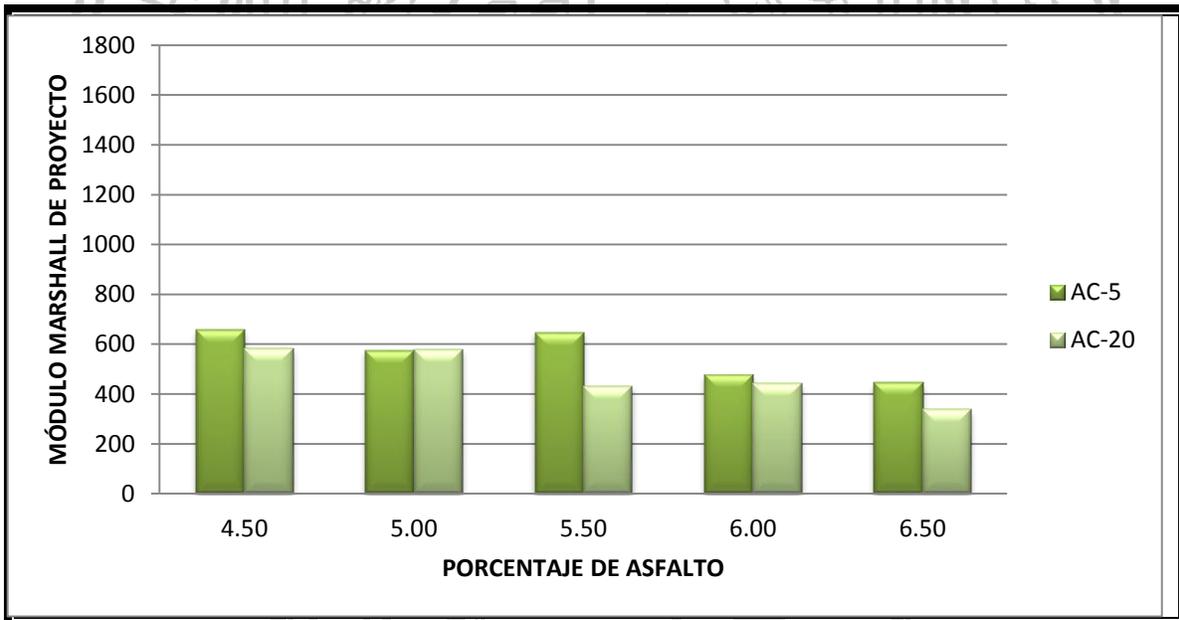


FIG. 4.40 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall de Proyecto para las Mezclas con 10% RAP.

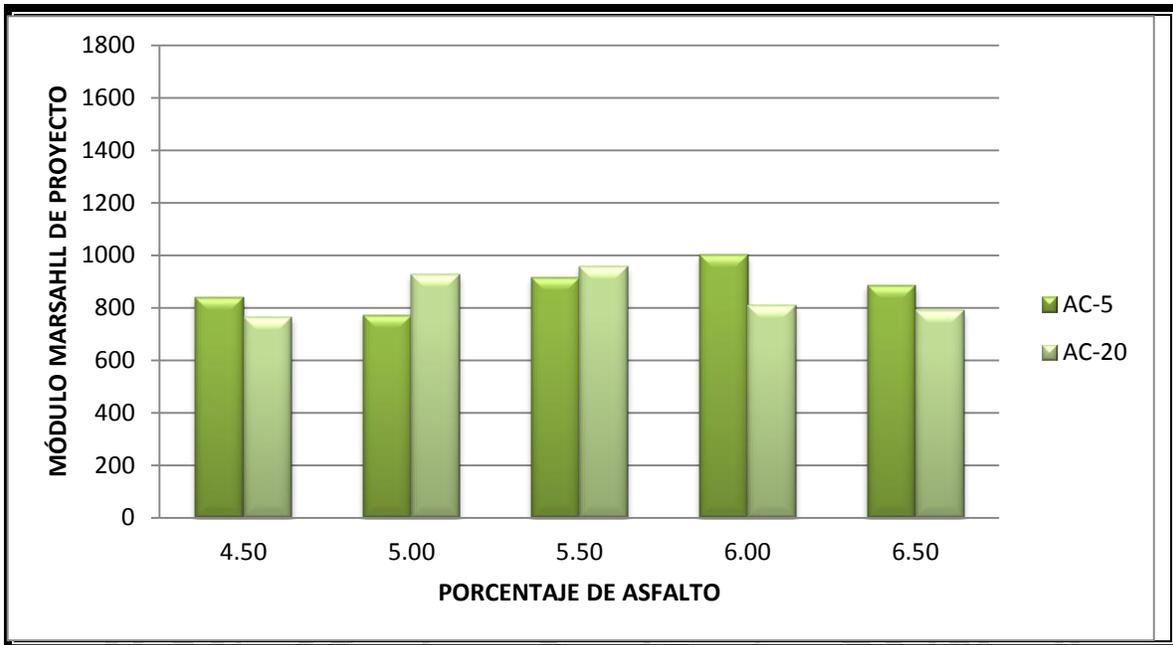


FIG. 4.41 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall de Proyecto para las Mezclas con 30% RAP.

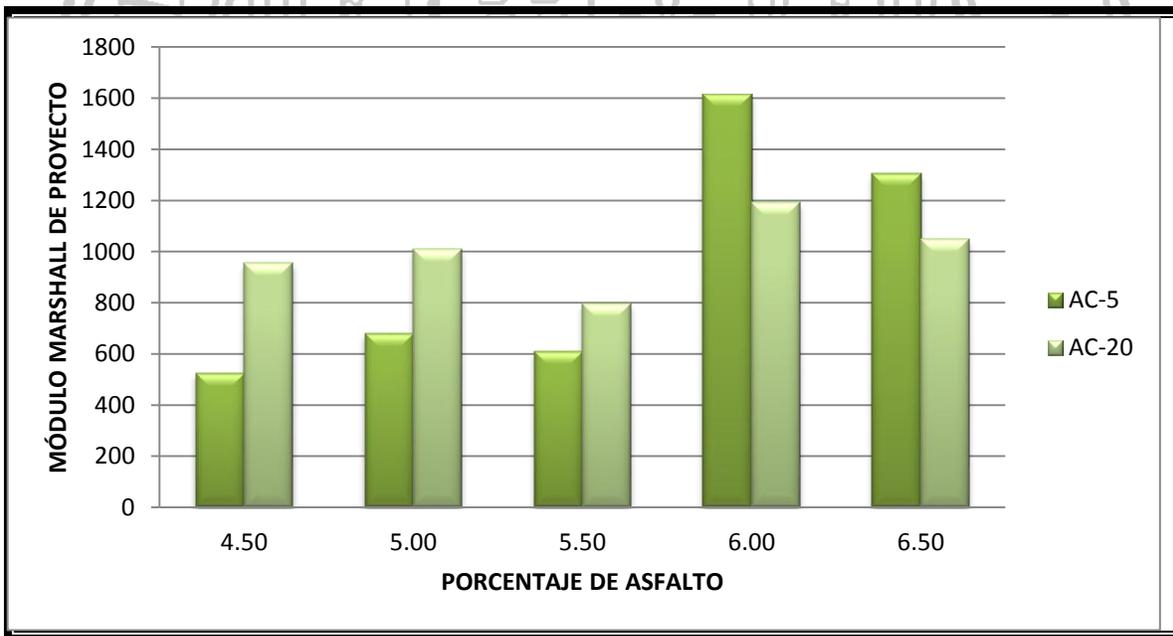


FIG. 4.42 Resultados de la Prueba de Módulo Marshall de Proyecto para las Mezclas con 50% RAP.

Con los resultados obtenidos en las graficas presentadas anteriormente, podemos observar características de rigidez en las mezclas asfálticas, donde las muestras con RAP incluido logran valores de rigidez mayores a las mezclas convencionales, estos aumentos nos hacen pensar en problemas futuros de desempeño de las mezclas, ya que al aumentar la rigidez de la mezcla la hace vulnerable a la falla por fatiga, sin embargo la



metodología Marshall no nos permite definir o determinar este parámetro, por lo que se hace necesario implementar otra metodología para el desarrollo correcto de la caracterización de la mezcla asfáltica.

En las normativas publicadas por las dependencias encargadas de la regulación y control de calidad de las mezclas asfálticas, recomiendan que ante la presencia de altos contenidos de material asfáltico recuperado, se debe bajar el grado PG de los asfaltos, lo cual nos permita pasar de un asfalto más duro a uno más blando con el fin de hacer más dúctil la mezcla y de esta forma disminuir el efecto de rigidización proporcionado por el RAP, lo cual es lógico, sin embargo en el desarrollo de este trabajo de investigación se pudo observar que no siempre pasa este efecto, ya que en las gráficas de los módulos Marshall muestran una tendencia por parte del AC-5 mayor en comparación con el AC-20, lo que quiere decir que a pesar de disminuir el grado PG la mezcla adquiere mayor rigidez, las causas de este efecto pueden ser:

- El asfalto AC-5, es producto de una modificación de un AC-20 con la ayuda de algún agente volátil que le permite disminuir su dureza y hacerlo más dúctil, hasta cumplir con los requisitos de calidad establecidos por la SCT (N-CMT-4-05-001). Dado que el agente modificador es volátil y el asfalto para poder ser incorporado al agregado pétreo se debe calentar, el modificador se volatiliza dejando así un asfalto con propiedades muy similares al AC-20, pero obviamente en una cantidad más pequeña que la mezcla asfáltica fabricada originalmente con un AC-20, y es precisamente en ese punto donde el RAP influye de manera más importante, ya que encontrándose menos asfalto de aportación que permita el flujo de la mezcla, esta mezcla aumenta su módulo como consecuencia.
- El proceso de fabricación de la muestra de las mezclas asfálticas influye de forma importante, ya que para ello se requiere trabajar con materiales sometidos a temperaturas elevadas, donde en especial el asfalto puede sufrir cambios muy significativos al ser sobre calentado o ser calentado por periodos largos, ya que se verá envejecido y por consiguiente su resistencia aumentará.



CONCLUSIONES

- Lamentablemente con la información proporcionada en la base de datos por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se convierte de forma importante la necesidad de una conservación, rehabilitación y/o reconstrucción de los tramos carreteros que componen la red carretera del estado de Michoacán. Considerando esto y tomando en cuenta la situación financiera y ambiental por la que se atraviesa actualmente, para realizar las actividades mencionadas anteriormente el lograr desarrollar técnicas que nos permitan optimizar los recursos necesarios en las actividades carreteras juega un singular papel.

Bajo esta sintonía el reciclado de mezclas asfálticas nos brinda la oportunidad de lograr llevar a cabo carpetas asfálticas constituidas por un porcentaje de material RAP, donde dicho material actualmente es desperdiciado en su mayoría de los casos, representando así, un impacto ecológico y económico negativo, cuidando claro esta, que las carpetas asfálticas diseñadas con la presencia de este material, cumplan o incluso mejoren las características de desempeño de las mezclas ordinarias.

Es de suma importancia el tener un control de calidad en el proceso de fresado para la obtención del material RAP, ya que esto afectara de forma directa a la granulometría de dicho material. De esta forma se disminuye la probabilidad de tener la necesidad de llevar a cabo algún proceso de disgregación o trituración del material.

- El banco de agregado pétreo analizado no cumple inicialmente con las características granulométricas estipuladas en la normativa de diseño Marshall, lo cual nos conlleva a la necesidad de realizar una redistribución granulométrica de dichos agregados que nos permita cumplir con las especificaciones de diseño Marshall. Dicha situación del banco analizado se da por un proceso de trituración deficiente, esta problemática se podría solucionar con la revisión puntual en la calibración de las maquinas trituradoras.
- Con la realización de las pruebas estipulas en la metodología Marshall para el diseño de pavimentos, se logro determinar la influencia del RAP cuando es incorporado en las mezclas asfálticas.

La presencia de material asfaltico recuperado nos permite tener mezclas asfálticas con un mejor comportamiento en la prueba de estabilidad y flujo Marshall, aumentando este de valores que oscilan entre 700 a 1000 kilogramos, a valores



de 1000 hasta los 3000 kilogramos presentes en mezclas con presencia del 50% RAP.

Esto nos permite definir que el RAP influye de forma importante en el comportamiento de mezcla otorgándole propiedades de rigidización de la misma observadas en los valores de los módulos Marshall obtenidos en este estudio, esta situación te permite obtener módulos dinámicos más elevados, sin embargo hace susceptible a las mezclas al comportamiento de fatiga.

Para el análisis de dichas situaciones mencionadas anteriormente la metodología Marshall es insuficiente, ya que esta no toma en cuenta dichos parámetros, por lo cual se hace insuficiente para la correcta caracterización de una mezcla asfáltica con material RAP incorporado.

El RAP es un material que definitivamente se puede aprovechar siendo reutilizado, sin embargo se debe tener en consideración un uso racional, ya que de lo contrario el efecto de su inclusión en mezclas asfálticas nuevas puede conllevar un desempeño de las mismas de menor calidad que sin la presencia del RAP, sobre todo en la parte de falla por fatiga. Una de las características del RAP es aportar mayor resistencia a la carpeta asfáltica en este caso, lo cual la lleva a un aumento en su módulo de rigidez y esto a su vez le disminuye su capacidad para absorber deformaciones, es decir, adopta características semejantes a una carpeta rígida. Esta situación influirá de forma directa en los resultados que se puedan obtener con la realización de la prueba a fatiga, donde de presentar el comportamiento antes mencionado las leyes de fatiga disminuirían considerablemente y con esto se esperaría una vida útil del pavimento menor al de las mezclas asfálticas convencionales.

El siguiente paso sería evaluar mezclas asfálticas con RAP utilizando la metodología de diseño de protocolo AMAAC, ya que esta metodología permite evaluar además susceptibilidad de la mezcla a la humedad, donde seguramente presente un comportamiento inadecuado.

Con la realización de este trabajo de investigación se concluye que el comportamiento de la mezclas con material recuperado es recomendable siempre y cuando sea e porcentajes bajos y considerando además características de cargas a las que estará sujeta la carpeta asfáltica, condiciones climáticas determinación del porcentaje óptimo de asfalto de aportación, lo cual dependerá del porcentaje de asfalto presente en el RAP. Además la metodología Marshall se vuelve inadecuada para un análisis de mayor precisión en la caracterización de una mezcla asfáltica, ya que según los resultados obtenidos en este proyecto de investigación el uso de RAP arroja resultados sumamente satisfactorios en comparación a las mezclas asfálticas convencionales, sin embargo, se convierte indudablemente necesario la implementación de otras metodologías como el Protocolo de Diseño AMAAC, para de esta forma obtener los comportamiento del pavimento más apegados a los reales.

- El comportamiento de los resultados obtenidos en los módulos Marshall tanto los máximos como de proyecto, mostraron un comportamiento inesperado, ya que, las mezclas fabricadas con el AC-5 desarrollaron módulos mas elevados en comparación con las mezclas del AC-20, una de las circunstancias por las cuales



se dio esta situación tendría que ver con la modificación del AC-5 por lo cual se debería llevar a cabo una reología de dicho asfalto para de esta manera conocer sus propiedades. Otra situación que pudo dar lugar a los resultados obtenidos iría dirigida al proceso constructivo de los especímenes, ya que se pudo haber envejecido mas el AC-5 que el AC-20.

Considerando lo anterior el conocer los comportamientos y las características de los asfaltos de aportación se vuelven sumamente importante, ya que este influye de forma directa en el desempeño de las mezclas asfálticas, y sobre todo con estos resultados se determina que, la sugerencia propuesta por las dependencias encargadas en la normativa del área de las vías terrestres, la cual propone en bajar el grado PG del asfalto y de esta forma disminuir la rigidez de la mezcla analizada no siempre es aplicable.





BIBLIOGRAFÍA

- Dirección general de conservación de carreteras SCT (secretaría de comunicaciones y transportes).
- Publicación técnica No. 246 del IMT (instituto mexicano del transporte).
- Norma N-CMT-4-05-003-08 de la secretaría de comunicaciones y transportes (SCT).
- Norma M-MMP-1-05/03 de la secretaría de comunicaciones y transportes (SCT).
- Norma N-CMT-4-05-001-06 de la secretaría de comunicaciones y transportes (SCT).
- Diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) con alto contenido de pavimento asfáltico reciclado (RAP). Publicación de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C
- www.ingenierocivilinfo.com
- Vías de Comunicación; autor: Crespo Villalaz.
- Volumen Alfonso Rico Rodríguez.