



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil

Estudio del comportamiento a tensión indirecta en carpetas asfálticas

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Ingeniero civil

Presenta:
Carolina Leal Rocha

Dirigido por:
Dr. J. Jesús Alonso Mota

SINODALES

J. Jesús Alonso Mota
Presidente

Firma

José Alfredo Zepeda Garrido
Secretario

Firma

Alfredo Pérez García
Vocal

Firma

Ma. De la Luz Pérez Rea
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez
González
Director de la Facultad

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
2012 México



Resumen

Con el fin de mejorar el control de calidad de las mezclas asfálticas, logrando un mejor desempeño de los pavimentos en su conjunto, se han hecho esfuerzos por conocer sus características mecánicas que permitan valorar su comportamiento ante las sollicitaciones inducidas por el tránsito.

Durante el desarrollo de esta investigación se estudiaron las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas producidas en las plantas instaladas en la región, poniendo especial énfasis en las propiedades de resistencia a tensión indirecta, estabilidad y flujo en especímenes Marshall hechos en planta y núcleos de carpeta terminada, mediante la toma de muestras de mezcla asfáltica directamente de la producción en las plantas fabricantes y la extracción de núcleos de las carpetas construidas con esas mezclas.

Mediante el análisis de resultados de las pruebas de campo y laboratorio efectuadas, se observó que, en general, las mezclas presentan deficiencias en su composición granulométrica; los valores de estabilidad y flujo de las mezclas son adecuados, según la normatividad oficial. Los valores de resistencia a la tensión indirecta, propiedad no indicada en la norma vigente, presentan variaciones significativas que pueden atribuirse a deficiencias en el proceso de transporte, colocación y compactación de las mezclas.

Puede concluirse que los valores de estabilidad Marshall no reflejan adecuadamente la capacidad de la carpeta para resistir los esfuerzos de tensión, ya que variaciones significativas en estos valores no siempre dan lugar a cambios en su resistencia a la tensión.

Los niveles de densificación alcanzada por la carpeta asfáltica guardan una buena correlación con su resistencia a la tensión cuando la mezcla ha sido



procesada adecuadamente; sin embargo, podrían no detectarse deficiencias en la capacidad para resistir esfuerzos a tensión.

Se concluye que las mezclas asfálticas muestran una buena correlación entre su resistencia a la tensión medida en especímenes Marshall y núcleos de la carpeta asfáltica terminada, ésto permite ver la conveniencia de normar un valor mínimo de resistencia a la tensión en el producto terminado, es decir, en la carpeta asfáltica, como resultado de un procesamiento adecuado de la mezcla, en las etapas de acarreo, tendido y compactación.



Dedicatorias

Dedicada a 4 mujeres que admiro:
Maty, Susan, Pau y Camila



Agradecimientos

En primer lugar quiero y doy gracias a Dios, que desde antes de la fundación del mundo pensó en mí para que yo viniera a este mundo a conocerlo y a cumplir con los planes que él tiene para mí, pero más gracias le doy porque me conoce y me deja conocerlo.

A mis padres, que gracias a lo que me han enseñado soy quien soy, por la educación que me ha dado, el apoyo y la confianza para llegar a hacer de esto algo real y no solo planes.

A mis hermanas, que me han enseñado la responsabilidad de dar el ejemplo y también porque me han enseñado a que no todo en la vida es seriedad y estudio.

A los maestros, que en cada clase me dejaron sus conocimientos tanto laborales como personales e intelectuales, en especial doy gracias al Ing. Felipe Zepeda Garrido porque en medio de su seriedad dejó ver su personalidad y toda su experiencia y al Ing. Pablo Hernández por no solo mostrar su parte profesional, sino también su lado humano y amigo.

En especial también le doy las gracias al Dr. Jesús Alonso Mota por darme la confianza y la oportunidad de realizar este trabajo en equipo con él, por su paciencia y por compartir toda su experiencia. Al M. en I. Alfredo Zepeda, a la Dr. Teresa López, al Dr. Luz Pérez Rea y al Dr. Alfredo Pérez les agradezco por que gracias a ellos, ya sea como maestros o como sinodales, me han transmitido el gusto por esta carrera y en particular por el área de geotecnia.

A mis amigos que para bien o para mal son parte de las experiencias inolvidables y atesoradas que me dejó esta facultad. Que algunos serán amigos para toda la vida y otros solo mientras estuvimos aquí.

Y a COMPA que me dejó experimentar el compartir mi fe con mis compañeros de clase y mis amigos de una forma diferente, por cada persona que ahí conocí y por estar conmigo en todo momento.

Y por su puesto a esta universidad por darnos las herramientas necesarias para servir a la sociedad.



Índice

Resumen	<i>i</i>
Dedicatorias	<i>iii</i>
Agradecimientos	<i>iv</i>
Índice	<i>v</i>
Índice de figuras	<i>viii</i>
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1 INTRODUCCIÓN	3
2.1.1 Programa nacional de infraestructura 2007-2012	5
2.1.2 Sector comunicaciones y transportes	8
2.1.2.1 Carreteras	9
2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS	10
2.2.1 Definición	10
2.2.2 Pavimento rígido	11
2.2.3 Pavimento flexible	11
2.2.4 Pavimentos combinados o mixtos	13
2.2.5 Funciones de las capas que conforman un pavimento	13
2.2.5.1 Pavimento flexible o asfáltico	13
2.2.5.2 Pavimento rígido	15
2.3 COMPORTAMIENTO DE LAS CARPETAS ASFÁLTICAS	16
2.3.1 Propiedades de diseño	16
2.3.2 Tipos de fallas en los pavimentos	24
2.3.3 Composición de las carpetas asfálticas	29
2.3.3.1 Material pétreo	29
2.3.3.2 Asfaltos	32
2.3.4 Estado actual y futuro de los pavimentos	40
2.4 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	42
2.4.1 Definición	42
2.4.2 Clasificación	42
2.4.2.1 Mezclas asfálticas en caliente	42
2.4.2.2 Mezclas asfálticas de granulometría densa	43
2.4.2.3 Mezcla asfáltica en frío de granulometría abierta	43
2.4.2.4 Mezcla asfáltica de granulometría discontinua o tipos SMA	44
2.4.2.5 Mezclas asfálticas en frío	44
2.4.2.6 Mezcla asfáltica en frío de granulometría densa	45
2.4.2.7 Mortero asfáltico	45
2.4.2.8 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos	45
2.5 MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	52
2.5.1 Método de Marshall	53
2.5.2 Método de Hveem	57
2.6 NORMATIVIDAD	59
2.6.1 Granulometría	60
2.6.2 Densidad relativa de materiales pétreos	60
2.6.3 Desgaste “Los Ángeles”	63



2.6.4	Forma de partículas.....	64
2.6.5	Contenido de asfalto	64
3.	METODOLOGÍA	66
3.1	INTRODUCCIÓN	66
3.2	TRABAJOS DE CAMPO	67
3.2.1	Muestreo de la mezclas asfálticas	67
3.2.1.1	Envase e identificación	68
3.2.1.2	Transporte y almacenamiento	68
3.2.2	Muestreo de núcleos de carpeta.....	69
3.2.2.1	Identificación, transporte y almacenamiento.....	70
3.3	TRABAJOS DE LABORATORIO.....	70
3.3.1	Ensayes de laboratorio para mezclas asfálticas.....	71
3.3.1.1	Contenido de asfalto	71
3.3.1.2	Granulometría	74
3.3.2	Ensayes de laboratorio para especímenes elaborados mediante el método Marshall y para núcleos de carpeta.....	76
3.3.2.1	Peso volumétrico	76
3.3.2.2	Porcentaje de vacíos	78
3.3.2.3	Estabilidad y flujo	80
3.3.2.4	Tensión indirecta	83
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS	85
4.1.1	Características granulométricas.....	85
4.1.2	Contenido de asfalto	87
4.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES ELABORADOS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.....	88
4.2.1	Peso volumétrico.....	88
4.2.2	Estabilidad y flujo	88
4.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA ESTUDIADOS	89
4.3.1	Peso volumétrico y grado de compactación de la carpeta asfáltica	89
4.3.2	Resistencia a la tensión indirecta.....	90
4.4	RELACIÓN PESO ESPECÍFICO Y RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA.....	91
4.5	RELACIÓN ENTRE ESTABILIDAD Y RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA EN ESPECÍMENES MARSHALL	93
4.6	RELACIÓN ENTRE TENSIÓN INDIRECTA DE ESPECÍMENES MARSHALL Y NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA.....	95
5.	CONCLUSIONES	97
	REFERENCIAS.....	99



Índice de tablas

TABLA 2. 1 INVERSIÓN ESTIMADA DE INVERSIÓN AL SECTOR COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, CANTIDADES EXPRESADAS EN MILES DE MILLONES DE PESOS (CALDERÓN, 2007).	9
TABLA 2. 2. CAUSAS Y EFECTOS DE INESTABILIDAD EN EL PAVIMENTO (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007)	18
TABLA 2. 3 CAUSAS Y EFECTOS DE POCA DURABILIDAD (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007) ...	19
TABLA 2. 4. CAUSAS Y EFECTOS DE LA PERMEABILIDAD (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007)...	20
TABLA 2. 5 CAUSAS Y EFECTOS RELACIONADOS CON LA TRABAJABILIDAD (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007)	21
TABLA 2. 6. CAUSAS Y EFECTOS DE LA MALA RESISTENCIA A LA FATIGA. (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007)	23
TABLA 2. 7. CAUSAS Y EFECTOS DE LA MALA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007).....	24
TABLA 2. 8 TIPOS Y MANIFESTACIONES DE LAS FALLAS DE LOS PAVIMENTOS. (CAMARGO-MORENO Y GONZÁLEZ-PÉREZ, 2007).....	27
TABLA 2. 9. TIPOS DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS OBTENIDOS POR DESTILACIÓN DIRECTA DEL PETRÓLEO CRUDO. (CRESPO-VILLALAZ, 2004).	34
TABLA 2. 10 TIPOS DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS LÍQUIDOS (CRESPO-VILLALAZ, 2004).	35
TABLA 2. 11 ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS (OLIVERA BUSTAMANTE, 2002).	36
TABLA 2. 12 TEMPERATURAS DE MEZCLADO PARA MEZCLAS EN CALIENTE N-CMT-05-003/02	42
TABLA 2. 13 ESPECIFICACIONES PARA MATERIALES PÉTREOS QUE SE EMPLEAN EN CARPETAS ASFÁLTICAS POR EL MISMO SISTEMA DE RIEGOS DE SELLOS (MATERIAL 3) (OLIVERA BUSTAMANTE, 2002).	47
TABLA 2. 14 CANTIDADES DE MATERIAL PÉTREO Y CEMENTO ASFÁLTICO QUE SE RECOMIENDAN PARA CONSTRUIR CARPETAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS. PARA CONOCER LA CANTIDAD DE ASFALTO REBAJADO O EMULSIFICADO, LA CANTIDAD DE CEMENTO ASFÁLTICO SE DIVIDE ENTRE EL PORCENTAJE DE ESTE MATERIAL CONTENIDO EN EL PRODUCTO ASFÁLTICO Y ES EL RESULTADO DE UNA PRUEBA DE DESTILACIÓN (OLIVERA BUSTAMANTE, 2002).	48
TABLA 2. 15 CONSTANTES DE ÁREA PARA ENCONTRAR EL PORCENTAJE DE CONTENIDO MÍNIMO DE CUBRIMIENTO TOTAL, CON BASE EN LA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO. (OLIVERA BUSTAMANTE, 2002).	49
TABLA 2. 16 FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA ESTABILIDAD MARSHALL CON RESPECTO A LA ALTURA OBTENIDA AL ELABORAR LOS ESPECÍMENES.	56
TABLA 2. 17 REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA PARA ΣL MAYOR A 10^6	61
TABLA 3. 1FORMATO DE REGISTRO DE DATOS PARA EL CÁLCULO DEL PESO VOLUMÉTRICO Y GRADO DE COMPACTACIÓN	77
TABLA 3. 2 FORMATO DE APOYO PARA EL REGISTRO Y CÁLCULO DE DATOS PARA PORCENTAJE DE VACÍOS	78
TABLA 3. 3 REQUISITOS DE PORCENTAJE DE VACÍOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA.	79
TABLA 3. 4 FORMATO DE APOYO PARA EL REGISTRO DE DATOS DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO.	82
TABLA 3. 5 REQUISITOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.	82
TABLA 3. 6 FORMATO DE APOYO PARA EL REGISTRO DE DATOS DE TENSIÓN INDIRECTA.....	84
TABLA 4. 1GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, CON TAMAÑO NOMINAL DE 12.5 MM (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL)... ..	87
TABLA 4. 2 CONTENIDO DE ASFALTO EN LA MEZCLA.	87
TABLA 4. 3 PESO VOLUMÉTRICO DE ESPECÍMENES MARSHALL.	88
TABLA 4. 4 ESTABILIDAD Y FLUJO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ESTUDIADAS.	89
TABLA 4. 5 PESO VOLUMÉTRICO DE LOS NÚCLEOS Y GRADO DE COMPACTACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA.	90
TABLA 4. 6 RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA DE LOS NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA.	90



Índice de figuras

FIGURA 2. 1. COMPETITIVIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL A NIVEL MUNDIAL, PROYECTO NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA 2007-2012.	7
FIGURA 2. 2 COMPETITIVIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL EN LATINOAMÉRICA, PROYECTO NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA 2007-2012.	8
FIGURA 2. 3 ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO	11
FIGURA 2. 4 ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	12
FIGURA 2. 5 ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	13
FIGURA 2. 6. GRÁFICA PARA MEZCLAS EN EL LUGAR (CRESPO- VILLALAZ. 2004).	31
FIGURA 2. 7. GRANULOMETRÍA PARA CONCRETO ASFÁLTICO (CRESPO- VILLALAZ. 2004).....	31
FIGURA 2. 8 ESPÉCIMEN COLOCADO ENTRE LAS DOS SECCIONES DE LA CABEZA DE PRUEBA MARSHALL.	57
FIGURA 2. 9 ENSAYO HVEEM.....	59
FIGURA 3. 1 EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA	67
FIGURA 3. 2 IDENTIFICACIÓN DE ESPECÍMENES MARSHALL	69
FIGURA 3. 3 OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA.	72
FIGURA 3. 4 CUARTEO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA.	72
FIGURA 3. 5 COLOCACIÓN DE MATERIAL EN EQUIPO ROTAREX	73
FIGURA 3. 6 EXTRACCIÓN DE MATERIAL LAVADO.....	73
FIGURA 3. 7 EXTRACCIÓN DE MATERIAL LAVADO.....	75
FIGURA 3. 8 ESPECÍMENES DE CONCRETO ASFÁLTICO, ELABORADOS MEDIANTE EL MÉTODO DE MARSHALL	80
FIGURA 3. 9 COLOCACIÓN DE LAS MUESTRAS EN BAÑO MARÍA	81
FIGURA 3. 10 ENSAYE DE LOS ESPECÍMENES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN LA PRENSA DE MARSHALL, PARA LA DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD Y FLUJO.	81
FIGURA 4. 1 CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS MATERIALES PÉTREOS ANALIZADOS, PARA TAMAÑO NOMINAL DE 12.5 MM.	86
FIGURA 4. 2 RELACIÓN ENTRE EL PESO VOLUMÉTRICO Y LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA	92
FIGURA 4. 3 RELACIÓN ENTRE LA ESTABILIDAD EN ESPECÍMENES MARSHALL Y LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA, EN NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA.	94
FIGURA 4.4 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA EN ESPECÍMENES MARSHALL Y LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA EN NÚCLEOS DE CARPETA ASFÁLTICA.	95



CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El transporte por carretera en la República Mexicana es el modo con mayor contribución a la actividad nacional. Por la red carretera fluye el 80 % de la carga que se mueve en el territorio y el 98 % del movimiento de pasajeros, contribuyendo de manera muy significativa al desarrollo comercial, social e industrial. Sin embargo, las malas condiciones de la superficie de rodamiento de las carreteras o vialidades urbanas se traduce en un bajo nivel de servicio al usuario, incidiendo de manera muy importante en los costos de operación del transporte, índice de accidentalidad, mermas en el valor de la carga transportada, incomodidad del usuario, etc. (Pérez y Alonso, 2006)

Los niveles de calidad de servicio al usuario dependen fundamentalmente de las condiciones superficiales de los pavimentos, las cuales van cambiando prácticamente desde el momento de la puesta en operación de la vía. Dichas condiciones son función de una amplia y compleja gama de factores que inciden sobre la estructura de los pavimentos, propiciando su deterioro.

La estructura típica de un pavimento asfáltico, está conformada por un conjunto de capas de materiales granulares, construidas sobre las terracerías, cuyas principales funciones son proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tránsito de los vehículos en condiciones adecuadas de seguridad y comodidad, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito. La capa más superficial consiste en una carpeta, construida mediante el empleo de mezclas asfálticas



fabricadas en planta mediante el empleo de cementos asfálticos, o elaboradas en el lugar, con la aplicación de emulsiones asfálticas como ligantes.

El mantenimiento de la red carretera es uno de los problemas más relevantes y uno de los más importantes a resolver. En nuestro país y particularmente en Querétaro, la expansión y mejora de la red carretera no se ha visto acompañada por un aumento proporcional de los presupuestos de mantenimiento. En cambio, el crecimiento del tránsito ha sido en muchos casos mayor que el esperado y las cargas de los vehículos pesados han excedido la capacidad de soporte de muchos de los pavimentos. La combinación de estos factores ha producido un aumento en el deterioro de las carreteras. (Garnica P., et al, 1998)

1.2 Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo del proyecto de investigación son los siguientes:

- Analizar las características físicas básicas, propiedades mecánicas, valores de resistencia a tensión indirecta, estabilidad, flujo de las mezclas asfálticas y determinar en el laboratorio las proporciones de los materiales componentes de estas para los distintos bancos de materiales pétreos donde se encuentran instaladas las plantas fabricantes de concreto asfáltico.
- Determinar las propiedades mecánicas de las mezclas, previamente a su colocación en distintas obras viales y rehabilitación de pavimentos asfálticos.
- Analizar los valores de resistencia a tensión indirecta, estabilidad, flujo y peso volumétrico de las mezclas colocadas y definir un criterio de control de calidad de la carpeta en base a la resistencia a la tensión indirecta, que garanticen el comportamiento estructural adecuado de los pavimentos asfálticos.



CAPITULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La red carretera de todo país, constituye un elemento fundamental para el desarrollo económico y social de su población, de manera que las condiciones de servicio que dicha red presta al usuario impactan fuertemente en la calidad y costo de traslado tanto de personas como de mercancías.

Sin embargo, las malas condiciones de la superficie de rodamiento de las carreteras o vialidades urbanas se traduce en un bajo nivel de servicio al usuario, incidiendo de manera muy importante en los costos de operación del transporte, índice de accidentalidad, mermas en el valor de la carga transportada, incomodidad del usuario, etc.

La calidad del servicio que la red presta al usuario depende fundamentalmente de las condiciones superficiales de los pavimentos, las cuales van cambiando prácticamente desde el momento de la puesta en operación de la vía. Dichas condiciones con función de una amplia y compleja gama de factores que inciden sobre la estructura de los pavimentos, propiciando su deterioro.

Cabe señalar que el uso de las mezclas asfálticas en la construcción y rehabilitación de la capa de rodamiento de los pavimentos, tan ampliamente difundido en nuestro país, tiene una fuerte influencia en la calidad del servicio que la red carretera presta al usuario, de ahí la gran importancia que tiene el que las muestras asfálticas reúnan los requisitos de calidad necesarios para garantizar un buen desempeño durante la vida útil de las estructuras y el deterioro de sus capas sea menor.



El conocimiento y la interpretación adecuada de los factores que inciden en la falla de los pavimentos, contribuye a un mejor entendimiento de los mecanismos de deterioro de las distintas capas de un pavimento. El conocimiento de estos mecanismos de deterioro y su relación con las características físicas y mecánicas de las mezclas, permiten establecer procedimientos eficientes de diseño, fabricación y colocación de dichas mezclas, permiten establecer procedimientos eficientes de diseño, fabricación y colocación, de dichas mezclas, obteniendo un producto final que responda satisfactoriamente a las exigencias del tránsito usuario, a lo largo de la vida del periodo útil considerado para cada proyecto en particular.

El desempeño de las mezclas asfálticas empleadas en la construcción de la carpeta de un pavimento flexible se debe a su capacidad para tolerar las cargas que el tránsito diario le induce, generando así, deformaciones permanentes que paulatinamente van dando lugar a un proceso de fatiga, provocando el deterioro del pavimento. Las características que favorecen el buen comportamiento mecánico de la mezcla son básicamente la cohesión entre las partículas que le confiere el asfalto, así como la trabazón mecánica entre los agregados pétreos que constituyen el esqueleto mineral, por lo que es necesario evaluar esa cohesión a fin de tener la certeza de que la carpeta construida responderá satisfactoriamente ante las solicitaciones inducidas por el tránsito, tolerando las cargas acumulando deformación permanente moderada a lo largo de todo el periodo de vida del pavimento considerado el en proyecto.

En las últimas décadas, la demanda de mezclas asfálticas en la región ha propiciado la instalación de varias plantas elaboradoras de concretos asfálticos, las cuales han suministrado el material a las distintas dependencias y empresas dedicadas a realizar los trabajos de construcción y rehabilitación de la red carretera y vialidades urbanas del Estado y la región.



Actualmente algunas dependencias de los distintos niveles de gobierno y empresas particulares, entre ellas los propios fabricantes de mezclas asfálticas, realizan trabajos de verificación de algunas características de la mezcla; sin embargo, hace falta llevar a cabo un estudio sistemático y una integración de la información que permita tener un panorama amplio y a la vez preciso de los niveles de calidad alcanzados en las mezclas producidas por los distintos fabricantes. (Acevedo Vega, 2009)

2.1.1 Programa nacional de infraestructura 2007-2012

La infraestructura es sinónimo de desarrollo económico, social y humano. El crecimiento económico y las oportunidades de bienestar de la Naciones están claramente correlacionados con el grado de desarrollo de su infraestructura.

Por primera vez en la historia, México cuenta con un Programa Nacional de Infraestructura, que con objetivos claros y proyectos concretos permitirá incrementar la competitividad, la eficiencia de la economía del país, reducir desequilibrios regionales y combatir la pobreza, el actual Presidente Felipe Calderón ha presentado el Plan Nacional de Infraestructura, de acuerdo a los siguiente (Calderón, 2007):

La sociedad y el gobierno de México hemos avanzado paulatinamente pero firmemente en el diseño de ese futuro: Primero a través del Proyecto de Gran Visión “México 2030” establecimos un horizonte de planeación de largo plazo en torno a una visión del México que queremos; luego a través del Plan Nacional de Desarrollo formulamos las estrategias generales para los próximos seis años y ahora, a través de la formulación de diferentes planes y programas sectoriales y de manera muy destacada este programa nacional de infraestructura, diseñamos de manera concreta la tarea por hacer.

Están dadas las condiciones para que podamos avanzar en la dirección que queremos en materia de infraestructura, para fortalecer y modernizar nuestras



carreteras, puertos y aeropuertos, para edificar más presas, centrales eléctricas e instalaciones petroleras, así como para construir nuevas redes de electricidad, agua potable y drenaje.

Con este propósito, el Plan Nacional de Infraestructura 2007-2012 (Calderón, 2007), establece los objetivos, las metas y las acciones que impulsará el gobierno federal para aumentar la cobertura, calidad y competitividad de este sector estratégico para el desarrollo nacional. El programa asume el reto de construir una infraestructura sólida, actualizada y extendida en beneficio de las generaciones de hoy y de mañana. Por eso, define acciones con una visión integral de largo plazo.

El programa parte del conocimiento de que la infraestructura es un requisito imprescindible para avanzar más rápidamente en el cumplimiento de tres propósitos centrales para el desarrollo de México:

Primero, es un factor esencial para elevar la competitividad de las regiones porque reduce los costos y tiempos de transporte, facilita el acceso a mercados distantes, fomenta la integración de cadenas productivas e impulsa la generación de los empleos que tanto necesitamos.

Segundo, es un instrumento clave para contar con insumos energéticos suficientes, de calidad y a precios competitivos que amplíen los horizontes de desarrollo de las familias, de los emprendedores, de los productores, de los artesanos y de los prestadores de servicios.

Tercero, es un recurso poderoso para igualar las oportunidades de superación de las familias más pobres porque rompe el aislamiento y la marginación de las comunidades, promueve la educación, la salud y la vivienda, favorece la introducción de servicios básicos y multiplica las posibilidades de ingreso.



Así mismo el programa buscará dar un impulso sin precedente a la modernización de la carretera, aeroportuaria, portuaria, energética e hidráulica del país, cuidando en todo momento la sustentabilidad ambiental. Además, se ha trazado el objetivo de promover la infraestructura que se necesita para dar un impulso sin precedente al turismo.

En suma, el Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012 propone dar pasos decisivos para multiplicar los intercambios productivos, elevar la competitividad de la economía, llevar los servicios básicos a más familias, favorecer la integración de mercados, propiciar un desarrollo regional más equilibrado y generar los empleos que demandan millones de mexicanos. Para efectos de este programa, los sectores considerados son comunicaciones y transportes, agua y energía.

De acuerdo al Foro Económico Mundial en su informe 2006-2007 por la competitividad de su infraestructura México se ubica en el lugar 64 de 125 países, figura 2.1.

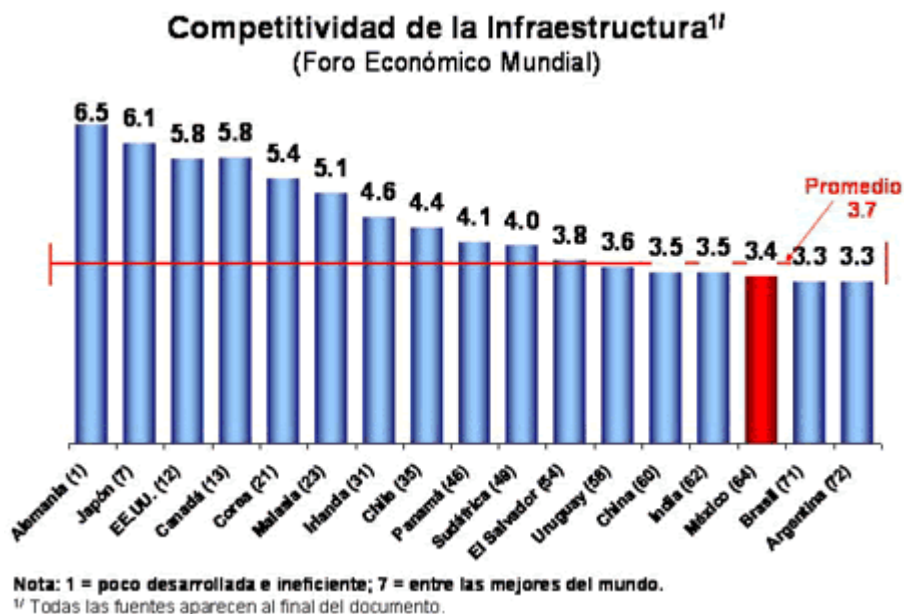


Figura 2. 1. Competitividad de la Infraestructura Nacional a nivel mundial, Proyecto Nacional de Infraestructura 2007-2012.

A nivel sectorial, México ocupa el lugar 65 en ferrocarriles, 64 en puertos, 55 en aeropuertos, 51 en telecomunicaciones y 49 en carreteras.

En América Latina, a nivel sectorial, México es 3° en ferrocarriles, 11° en puertos, 8° en aeropuertos, 14° en electricidad, 9° en telecomunicaciones y 6° en carreteras, figura 2.2.

Competitividad de la Infraestructura en América Latina
(Foro Económico Mundial)

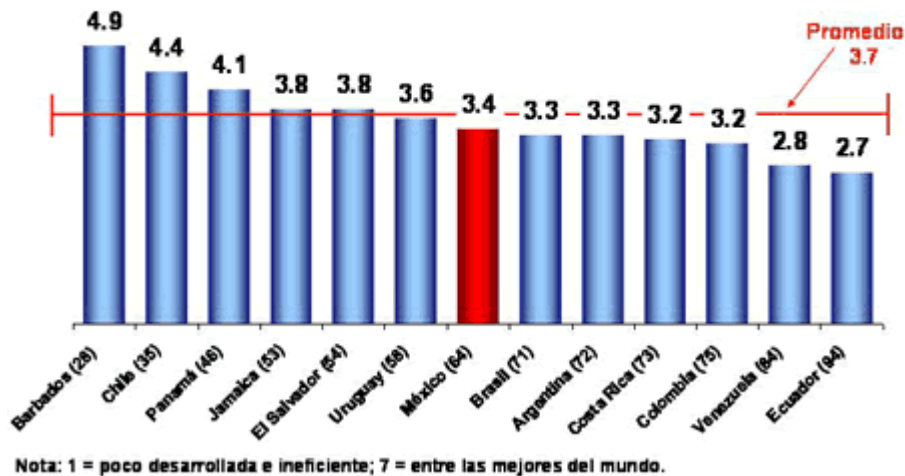


Figura 2. 2 Competitividad de la Infraestructura Nacional en Latinoamérica, Proyecto Nacional de Infraestructura 2007-2012.

Meta Global

- La meta para el 2030 es que México se ubique dentro del 20% de los países mejor evaluados de acuerdo con el índice de competitividad de la infraestructura que elabora el Foro Económico Mundial.
- Para alcanzar esta meta, en 2012 México debe convertirse en uno de los líderes de América Latina por la cobertura y calidad de su infraestructura.

2.1.2 Sector comunicaciones y transportes

Inversión estimada por fuente de financiamiento, 2007-2012 sin tomar en cuenta el Sector Energía, las cantidades expresadas son miles de millones de pesos, tabla 2.1.



Tabla 2. 1 Inversión estimada de inversión al sector comunicaciones y transportes, cantidades expresadas en miles de millones de pesos (Calderón, 2007).

Sector	Recursos Públicos	Recursos Privados	Total
Carreteras	159	128	287
Ferrocarriles	27	22	49
Puertos	16	55	71
Aeropuertos	32	27	59
Telecomunicaciones	19	264	283
Total	253	496	749

2.1.2.1 Carreteras

Estrategias

- Completar la modernización de los corredores troncales transversales y longitudinales que comunican a las principales ciudades, puertos, fronteras y centros turísticos del país con carreteras de altas especificaciones.
- Desarrollar ejes interregionales, que mejoren la comunicación entre regiones y la conectividad de la red carretera.
- Dar atención especial a la construcción de libramientos y accesos para facilitar la continuidad del flujo vehicular.
- Mejorar el estado físico de la infraestructura carretera y reducir el índice de accidentes

Metas 2012

- Construir o modernizar 17 mil 598 kilómetros de carreteras y caminos rurales, incluyendo la terminación de 12 mil 260 kilómetros que corresponden a 100 proyectos carreteros completos.



- Incrementar el 72 % a 90% la red federal que opera en buenas condiciones conforme a estándares internacionales.
- Reducir el índice de accidentes de 0.47 a 0.25 por cada millón de vehículos-kilómetro.

2.2 Tipos de pavimentos

2.2.1 Definición

El pavimento es definido como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados comprendida(s) entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito. En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto.

La estructura o disposición de los elementos que lo constituyen, así como las características de los materiales empleados en su construcción, ofrecen una variedad de posibilidades, de tal suerte que puede estar formado por una sola capa o, más comúnmente, por varias y, a su vez dichas capas pueden ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a muy diversos tratamientos; su superficie de rodamiento propiamente dicha puede ser una carpeta asfáltica, una losa de concreto hidráulico o estar formada por acumulaciones de material pétreo compactado. De hecho, la actual tecnología contempla una gama muy diversa de secciones estructurales diferentes. (Rico-Rodríguez y Del Castillo, 1982)

Los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de los que están constituidos y de cómo están estructurados, así como la resistencia

que presentan a la flexión, es por eso que de un modo bastante arbitrario y con fines fundamentales prácticos, los pavimentos se dividen en:

- Pavimento rígido
- Pavimento flexible
- Pavimentos combinados o mixtos

2.2.2 Pavimento rígido

Es aquel pavimento cuyo elemento fundamental resistente sea una losa de concreto hidráulico (reforzada o no), la cual le da una gran resistencia a la flexión, éste tipo de pavimentos se verá afectado en gran parte por los esfuerzos que tenga que resistir al expandirse o contraerse por cambios de temperatura y por las condiciones climáticas, es por ello que para su diseño se deben considerar parámetros tales como: volumen, tipo y peso de los vehículos que transitarán por la vialidad, resistencia del concreto a utilizar, condiciones climáticas, etc. En la figura 2.3 se puede apreciar la estructura típica de un pavimento rígido.

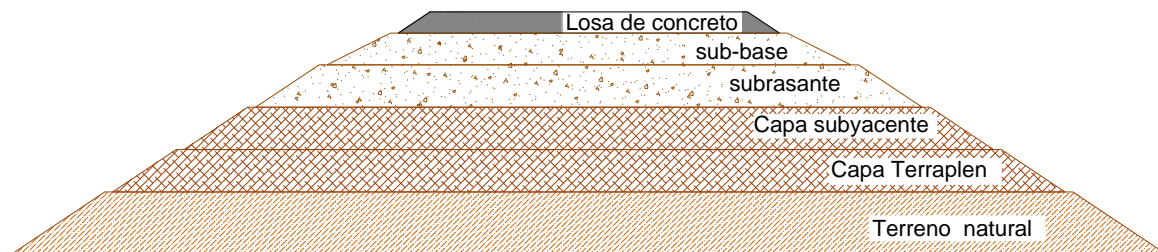


Figura 2. 3 Estructura de un pavimento rígido

2.2.3 Pavimento flexible

Un pavimento flexible, a diferencia de uno rígido se encuentra formado por varias capas las cuales se muestran en la figura 2.4.

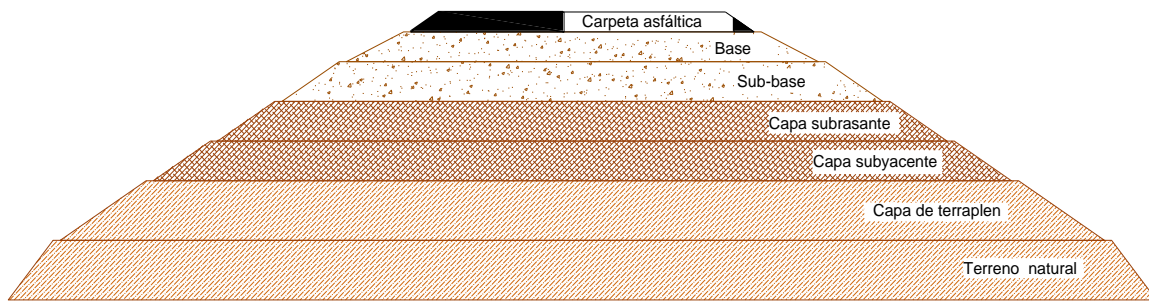


Figura 2. 4 Estructura de un pavimento flexible.

La calidad de las distintas capas que conforman un pavimento flexible puede disminuir de acuerdo a la profundidad, ya que la distribución de esfuerzos disminuye de acuerdo esta, de tal forma que la carpeta asfáltica debe tener un excelente diseño para soportar las cargas que son transmitidas por el tránsito diario, bajo esta capa formada típicamente por una mezcla de agregado pétreo y un aglutinante asfáltico, la cual constituye la superficie de rodamiento propiamente dicha, se disponen casi siempre por lo menos dos capas bien diferenciadas: una base de material granular y una sub-base formada preferentemente también por un suelo granular, aunque el requisito obligue menos que en la base, en el sentido de poderse admitir suelos de menor calidad, con mayor contenido de finos y menor exigencia en lo que se refiere a la granulometría; la razón es, obviamente, el mayor alejamiento entre la sub-base y la superficie de rodamiento, por el que llegan esfuerzos de menor intensidad.

Bajo la sub-base se dispone casi universalmente otra capa denominada sub-rasante, los requisitos de calidad para esta capa son menores a los mínimos requeridos para la sub-base, por lo cual su desempeño mecánico y su costo se discute cada vez menos.

Bajo la sub-rasante aparece el material convencional de la terracería, tratado mecánicamente en la actualidad casi sin excepciones, por lo menos en lo referente a la compactación.

2.2.4 Pavimentos combinados o mixtos

La característica principal de este tipo de pavimentos es que la superficie de rodadura está conformada ya sea por una mezcla asfáltica, como lo es el caso del pavimento flexible, o bien por una losa de concreto hidráulico como lo es en un pavimento rígido, de los cuales se indica la estructura típica en la figura 2.5.

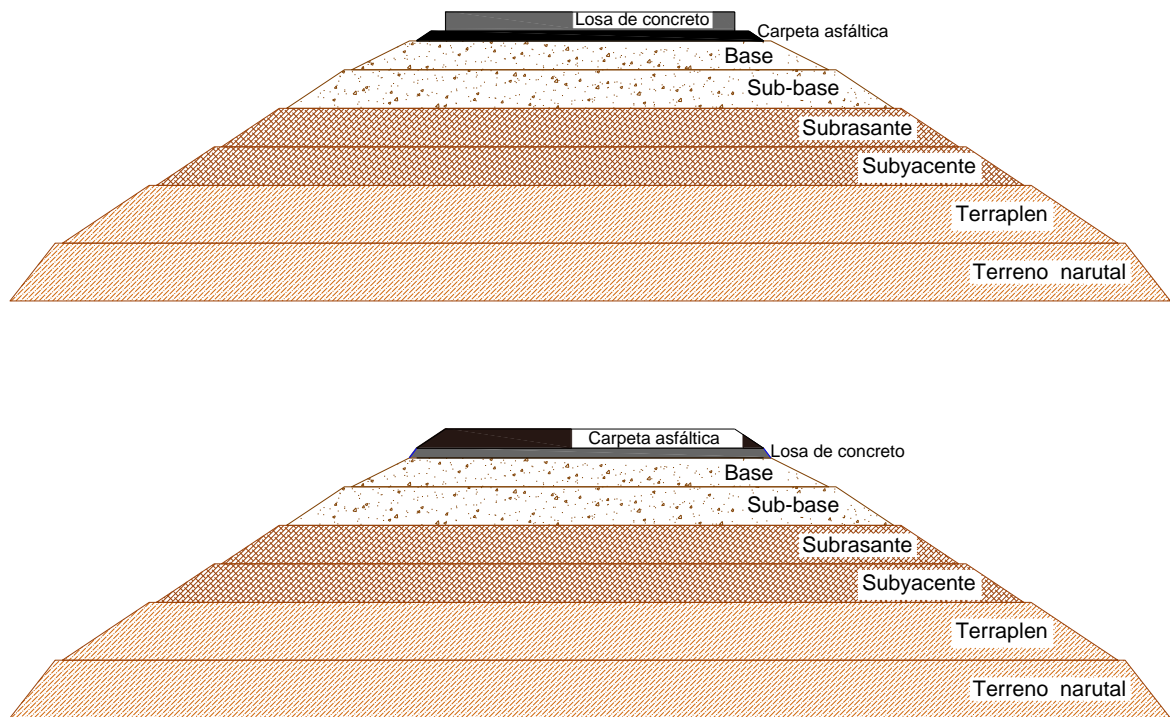


Figura 2. 5 Estructura de un pavimento flexible.

2.2.5 Funciones de las capas que conforman un pavimento

2.2.5.1 Pavimento flexible o asfáltico

Carpeta asfáltica:

- Proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura en todo tiempo
- Soportar las cargas y transmitir las adecuadamente a la base
- Servir como capa impermeable, constituyendo una protección para la base



La carpeta asfáltica es la parte que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y, aporta las características funcionales, estructuralmente absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. En condiciones de alta intensidad de tránsito puede llegar a alcanzar espesores importantes. Se construye con mezclas asfálticas en frío o en caliente, denominándose en este último caso, concretos asfálticos que pueden tener algún agente modificador para mejorar alguna de sus características. Cuando el espesor total de la carpeta es superior a ocho centímetros se construye por capas. Para mejorar sus características superficiales, como capas delgadas de mortero y lechadas asfálticas, carpetas drenantes de granulometría abierta u otro tipo de mejoras. (Zarate Aquino. 2003)

Riego de sello:

- Proporcionar una superficie de rodamiento antiderrapante
- Aumentar la impermeabilidad
- Evitar reflejos
- Soportar los efectos abrasivos del intemperismo
- Resistir los efectos abrasivos del tránsito

Base:

- Soportar los esfuerzos impuestos por las cargas aplicadas en la superficie del pavimento y distribuirlos adecuadamente, de manera que las capas inferiores los puedan resistir
- Proporcionar sub-drenaje al pavimento

La base es la capa situada bajo la carpeta. Su función es eminentemente resistente, pues absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o su resistencia a la deformación bajo las solicitaciones repetidas del tránsito suele corresponder a la intensidad del tránsito pesado. Así para tránsito medio y ligero se emplean las tradicionales bases granulares, pero para tránsito pesado se emplean materiales granulares tratados con un cementante, denominadas bases asfálticas o bases grava-cemento. (Zarate Aquino, 2003)



Sub-base:

- Sus funciones son similares a las de la base
- Abaratar los costos de la base

La sub-base es la capa que va debajo de la base y sobre la capa sub-rasante. Esta capa puede ser no necesaria cuando la capa sub-rasante es de elevada capacidad de soporte. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y construir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Es deseable que cumpla también una función drenante para lo cual es imprescindible que los materiales utilizados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean normalmente sub-bases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos estabilizados con cemento, etc. (Zarate Aquino, 2003)

Sub-rasante:

- Absorber las cargas que le transmite la sub-base y transmitirlas a un nivel adecuado al cuerpo del terraplén
- Absorber cambios volumétricos de las capas inferiores

Cuerpo de terraplén:

- Proporcionar los niveles que requiere la estructura
- Es de espesor variable y en muchos casos se construye con material del terreno natural

2.2.5.2 Pavimento rígido

Losa de concreto:

- Proporcionar una superficie de rodamiento adecuada
- Soportar las cargas aplicadas por el tránsito y transmitir a la capa de apoyo esfuerzos cuya magnitud no exceda su capacidad de soporte
- Resistir los efectos abrasivos del tránsito
- Impedir la penetración del agua superficial a las capas de apoyo



Sub-base:

- Proporcionar a la losa una superficie de apoyo continua y resistente
- Proporcionar sub-drenaje al pavimento
- Prevenir el fenómeno de bombeo
- Facilitar la construcción de la losa

Capa sub-rasante y cuerpo del terraplén:

- Las funciones de la capa sub-rasante y el cuerpo del terraplén de una estructura con pavimento rígido son similares a las de un pavimento flexible.

2.3 Comportamiento de las carpetas asfálticas

2.3.1 Propiedades de diseño

De acuerdo a Camargo-Moreno y González-Pérez (2007) las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, el inspector deberá estar consciente de qué significa cada una de estas propiedades, como es evaluada y qué representa en términos de rendimiento del pavimento.

Estabilidad:

La estabilidad de un asfalto es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable



desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo de tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo 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 (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capa de 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 más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Cuando no hay agregados disponibles con las características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna. La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos de carga (tráfico), la cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye.

Adicionalmente y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre las partículas existen



muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. La tabla 2.2 enuncia varias de estas causas y efectos.

Tabla 2. 2. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

ESTABILIDAD BAJA	
Causas	Efecto
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondo sin o con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Durabilidad:

La durabilidad en un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración de agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad. La mayor cantidad de asfalto aumenta la durabilidad por que las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por su puesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos. Una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, contribuye, de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa



proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento.

La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos minerales como la cal hidratada. La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña u compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos asociados con una poca durabilidad del pavimento. La tabla 2.3 presenta una lista de algunas de estas causas y efectos.

Tabla 2. 3 Causas y efectos de poca durabilidad (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

POCA DURABILIDAD	
Causas	Efecto
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregado susceptibles al agua (hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado

Impermeabilidad:

La impermeabilidad en un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos en la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezclas se relaciona con la impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad.



El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen en la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados. La tabla 2.4 cita ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de impermeabilidad para pavimentos asfálticos de graduación densa.

Tabla 2. 4. Causas y efectos de la permeabilidad (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Trabajabilidad:

Esta descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buen trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y, también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino y a la vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tal como



contenido de vacíos y estabilidad. Un contenido demasiado alto de relleno mineral puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo, alrededor de tapas de alcantarillado, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dicho sitios. Las mezclas que son fácilmente trabajables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado y/o demasiada humedad en la mezcla. Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. La tabla 2.5 cita algunas causas y efectos relacionados con la trabajabilidad de mezclas de pavimentación.

Tabla 2. 5 Causas y efectos relacionados con la trabajabilidad (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

MALA TRABAJABILIDAD	
Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactación y permanece tierna y blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable



Flexibilidad:

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo). Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

Resistencia a la fatiga

Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos de un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento (el periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasantes, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que están sobre subrasantes débiles. La tabla 2.6 presenta una lista de causas y los efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga.



Tabla 2. 6. Causas y efectos de la mala resistencia a la fatiga. (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efecto
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacios altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una superficie de pavimento de mínimo deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en todo terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie de pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr). Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de terracería áspera, en una mezcla de graduación abierta y con tamaño máximo de 9.5mm (3/8 in) a 12.5mm (1/2 in). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el polímetro (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al polímetro que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse y a exudar (flujo de asfalto en la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento. La tabla 2.7 presenta una lista de causas y los efectos relacionados con una mala resistencia al deslizamiento.



Tabla 2. 7. Causas y efectos de la mala resistencia al deslizamiento (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

MALA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Causa	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

2.3.2 Tipos de fallas en los pavimentos

Según Rico-Rodríguez y Del Castillo (1982) la mayor parte de la tecnología que el ingeniero de pavimentos ha ido desarrollando tiene por objeto evitar la aparición de todo un conjunto de deterioros y fallas, que se han ido tipificando y describiendo con el mayor detalle compatible con el nivel del conocimiento y en lo que es aún más importante, se ha ido estableciendo una relación causa-efecto, que permite desarrollar todo un conjunto de normas de criterio de proyecto y conservación. Es importante revisar brevemente, los más importantes y frecuentes deterioros que los pavimentos suelen sufrir, relacionándolos con las causas que los producen. Las fallas que los pavimentos presentan pueden ser variadas, ya sea por la falta de una nomenclatura universal y muchas veces por la zona geográfica y por quienes la construyeron.

Las fallas de los pavimentos pueden posiblemente dividirse en tres grupos fundamentales, de origen bien diferenciado.

Fallas de insuficiencia estructural:

Estas se tratan de pavimentos construidos con materiales inapropiados en cuanto a resistencia o con materiales de buena calidad, pero con espesor insuficiente. En términos generales ésta es la falla que se produce cuando las combinaciones de resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y los respectivos espesores no son los adecuados para que se establezca un mecanismo de resistencia apropiado.



Fallas por defectos constructivos:

Se tratan de pavimentos quizá bien proporcionados y formados por materiales suficientemente resistentes, en cuya construcción se han producido errores o defectos que comprometen el comportamiento conjunto.

Fallas por fatiga

Se trata de pavimentos que originalmente estuvieron quizá en condiciones apropiadas pero que por la continua repetición de las cargas del tránsito sufrieron efectos de fatiga, degradación estructural y, en general, pérdida de resistencia y deformación acumulada. Como quiera que estos fenómenos están grandemente asociados al número de repeticiones de la carga, las fallas de fatiga resultan claramente influidas por el tiempo de servicio; son las fallas típicas de un pavimento que durante mucho trabajó sin problemas.

Además de la anterior clasificación, por su origen conviene agrupar las fallas de los pavimentos flexibles por el modo en que suceden y se manifiestan. La tabla 2.8 presenta una clasificación en este sentido, con todas las fallas primariamente referidas a tres tipos: fracturamiento, deformación y desintegración. La tabla presenta también una diferenciación posterior de estos tres tipos en otros varios en que pueden subdividirse según la gravedad del defecto, asociando a éstos las causas mecánicas más comunes y, en algunas ocasiones los orígenes típicos. En general las causas últimas son las mismas para los tres tipos de fallas principales (tabla fallas) y se relacionan siempre con el efecto del tránsito, las características y estructuración del pavimento y la naturaleza del apoyo que proporciona la terracería, pero las variables específicas principales que más influyen en cada tipo de falla si pueden ser algo diferentes. La tabla 2.8 es un intento para agrupar qué características finales influyen más en cada uno de los tres tipos principales de fallas.

Como conclusión las fallas por insuficiencia estructural, defecto constructivo o fatiga pueden ser a fin de cuentas de cualquiera de los tres tipos fundamentales (fracturamiento, deformación o desintegración) y el que una



determinada deficiencia de origen a uno u otro tipo de falla dependerá de cómo se conjuguen en el caso todas las variables que genéricamente se agrupan bajo los encabezados “efectos del tránsito”, “características mecánicas y estructuración de los materiales en el pavimento” y “apoyo de las capas inferiores, de la terracería o, en última instancia, del terreno de cimentación”. A continuación se describen las fallas más comunes en pavimentos flexibles:

Agrietamiento en “piel de cocodrilo”:

Se trata de un agrietamiento que se extiende sobre toda la superficie de rodamiento o, por lo menos sobre una parte muy substancial de ella, por el cual dicha superficie adquiere el aspecto que da el nombre al fenómeno. Esta condición es indicativa de movimiento excesivo de una o más de las capas del pavimento o de fatiga, muchas veces en la misma carpeta. El agrietamiento en “piel de cocodrilo” es común en pavimentos flexibles construidos sobre terracerías resilientes o dentro de las cuales, la subrasante muestra resiliencia. También es típico de bases débiles o insuficientemente compactadas. El fenómeno puede ser o no progresivo; cuando lo es, termina en destrucciones locales del pavimento, que comienzan por los desprendimientos de la carpeta en lugares localizados y en rápida remoción de los materiales granulares expuestos. Cuando el fenómeno alcanza estos grados destructivos puede decirse casi con seguridad que está ligado a deficiencias estructurales en la base. En países en que el congelamiento es un fenómeno relevante, el agrietamiento es frecuente cuando se utilizan materiales susceptibles. También puede ser indicativo de lugares en que se requiere subdrenaje. Al estudiar este tipo de agrietamiento resulta esencial determinar si se trata de un fenómeno evolutivo. En general los procesos asociados a envejecimiento y fatiga de la carpeta progresan muy lentamente; en cambio son muy rápidas las evoluciones del fenómeno asociadas a deficiencia estructural o a exceso de agua. En consecuencia, para definir la evolución futura de un proceso detectado suelen ser precisos estudios de detalle en el pavimento.



Tabla 2. 8 Tipos y manifestaciones de las fallas de los pavimentos. (Camargo-Moreno y González-Pérez, 2007)

Tipo	Manifestación	Causas
Fracturamiento	Agrietamiento	<ul style="list-style-type: none"> -Exceso de carga (insuficiencia estructural) -Repetición de carga (fatiga) -Cambios de temperatura -Cambios de humedad (defecto constructivo) -Ondulamiento por fuerzas horizontales (deficiencia estructural o defecto constructivo) -Contracción
	Dstrucción por agrietamiento	<ul style="list-style-type: none"> -Exceso de carga (insuficiencia estructural) -Repetición de carga (fatiga) -Cambios de temperatura -Cambios de humedad (defecto constructivo)
Deformación	Deformación permanente	<ul style="list-style-type: none"> -Exceso de carga (insuficiencia estructural) -Proceso de deformación viscosa (fatiga, insuficiencia estructural y defecto constructivo) -Aumento de compacidad (defecto constructivo, rotura de granos) -Consolidación -Expansión
	Falla	<ul style="list-style-type: none"> -Exceso de carga (insuficiencia estructural) -Aumento de compacidad (defecto constructivo, rotura de granos) -Consolidación -Expansión
Desintegración (falla de la carpeta)	Remoción	<ul style="list-style-type: none"> -Pérdida de adherencia en la carpeta -Reactividad química -Abrasión por efecto del tránsito
	Desprendimiento	<ul style="list-style-type: none"> -Pérdida de adherencia en la carpeta -Reactividad química -Abrasión por efecto del tránsito -Degradación de los agregados



Deformación permanente en la superficie del pavimento:

Surcos: Frecuentemente está asociada a aumento de compacidad de las capas granulares de base o sub-base, debida a su vez a carga excesiva, carga repetida (aumento de compacidad por vibración) o a rotura de granos; también puede deberse a consolidación en la subrasante o aún en el cuerpo de la terracería. El ancho del surco excede al de la llanta y tiende a ser mayor en comparación de éste, cuanto más profunda sea la cedencia que provoca el fenómeno. La deformación a que se está haciendo referencia debe distinguirse del surco que se produce por simple desplazamiento lateral de una carpeta defectuosa; la señal distintiva es que en este último caso el material se eleva a los dos lados del surco, en tanto que en un surco de origen profundo, éste se produce sin dichas ondulaciones.

Fallas por cortante:

Están típicamente asociadas a falta de resistencia al esfuerzo cortante en la base o sub-base del pavimento y más raramente en la subrasante. Consisten generalmente en surcos profundos, nítidos y bien marcados, cuyo ancho no excede mucho del de la llanta. En éste caso suele haber también elevación del material de carpeta de ambos lados del surco, pero la falla se distingue fácilmente de un simple desplazamiento de carpeta por la mayor profundidad afectada.

Agrietamiento longitudinal:

Consiste en la aparición de grietas longitudinales de no gran abertura (en el orden de 0.5 cm) en toda el área que corresponde a la circulación de las cargas más pesadas. Agrietamientos de éste tipo son debidos a movimientos de las capas de pavimentos que tienen lugar predominantemente en dirección horizontal; el fenómeno puede ocurrir en la base, en la sub-base o, con cierta frecuencia, en la subrasante. Son indicativos de fenómenos de congelamiento y deshielo o de cambios volumétricos por variación del contenido de agua, sobre todo en la subrasante.



Consolidación del terreno de cimentación:

La consolidación de terrenos de cimentación blandos puede producir distorsión del pavimento, independientemente de los espesores o de la condición estructural del mismo. Las deformaciones de la sección transversal pueden producir agrietamientos longitudinales. Cuando por falla de resistencia en el terreno de cimentación, se compromete la estabilidad de los terraplenes, también se producen agrietamientos típicos con trayectoria circular, marcando lo que podría llegar a ser la cabeza de la falla eventual; estas grietas perjudican, como es natural, al pavimento.

2.3.3 Composición de las carpetas asfálticas.

Las carpetas asfálticas se componen de agregados pétreos y cemento asfáltico principalmente, los cuales deben cumplir con una serie de características que a continuación se mencionan en cuanto a agregado (Hornbostel, 2002)

2.3.3.1 Material pétreo

Los materiales pétreos para construir carpetas asfálticas son suelos inertes, provenientes de playones de ríos o arroyos, de depósitos naturales denominados minas o de rocas, los cuales, por lo general, requieren cribado y triturado para utilizarse. Las características más importantes que se deben tomar en cuenta al evaluar el material pétreo, son las siguientes: granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto según el autor (Olivera-Bustamante, 2002).

Sin embargo, otros autores hacen las siguientes recomendaciones en cuanto a las características físicas que debe cubrir el agregado pétreo que se pretenda emplear en la elaboración de carpetas asfálticas como peso volumétrico seco suelto, granulometría, densidad, absorción, desgaste, adherencia con el asfalto, índice de plasticidad, contracción lineal, etc. Pero en general, existen



requisitos que se deben tomar en cuenta a pesar de la opinión de los autores y a continuación se mencionan: (Crespo- Villalaz. 2004)

- No deben emplearse agregados pétreos que presenten más del 35% en peso, de fragmentos en forma de lascas o que tengan marcada tendencia a romper en forma de lascas cuando se tritura. Generalmente se consideran como lascas las que tengan una longitud mayor de tres veces la dimensión menor del agregado.
- No deben añadirse agregados pétreos que contengan materia orgánica en forma perjudicial o arcilla en grumos.
- Los agregados pétreos no deben tener más del 20% de fragmentos suaves.
- Los agregados pétreos deben emplearse de preferencia secos o cuando mucho con una buena humedad igual a la de absorción de ese material. En caso contrario, debe emplearse un adicionante en el asfalto.
- El tamaño máximo de agregado pétreo no deberá ser mayor que las 2/3 partes del espesor de la carpeta proyectada.
- Tener suficiente resistencia para soportar sin romperse, las cargas del equipo de compactación.
- La porción que pase la malla #40 no debe tener una contracción lineal mayor de tres para materiales que, en mezclas en el lugar, su granulometría caiga en la zona número uno, y del 2% si cae en la zona número dos. Para los concretos asfálticos la contracción lineal debe ser igual o menor a 2%.
- Los materiales pétreos deben llenar características granulométricas tales que su curva graficada debe quedar dentro de las zonas marcadas por las curvas siguientes (figura 2.6 y 2.7), según sea en caso.
- El desgaste determinado de la máquina *Los Ángeles* no debe ser mayor a 40%
- La absorción del material pétreo no debe ser mayor de 5%
- La densidad aparente del material no debe ser menor a 2.3%
- El material pétreo debe tener buena adherencia con el asfalto, debiendo satisfacer una de las siguientes especificaciones:

1. Desprendimiento máximo por fricción, 2.5%
 2. Cubrimiento máximo con asfalto inglés, 90%
 3. Pérdida máxima de estabilidad, por inmersión en agua, 25%
- El material pétreo debe resistir la prueba de intemperismo acelerado.

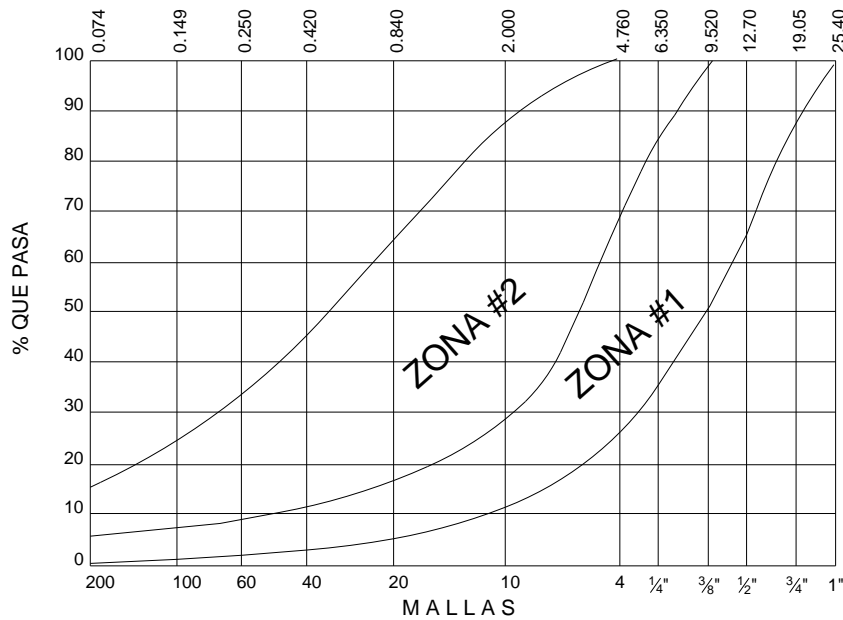


Figura 2. 6. Gráfica para mezclas en el lugar (Crespo- Villalaz. 2004).

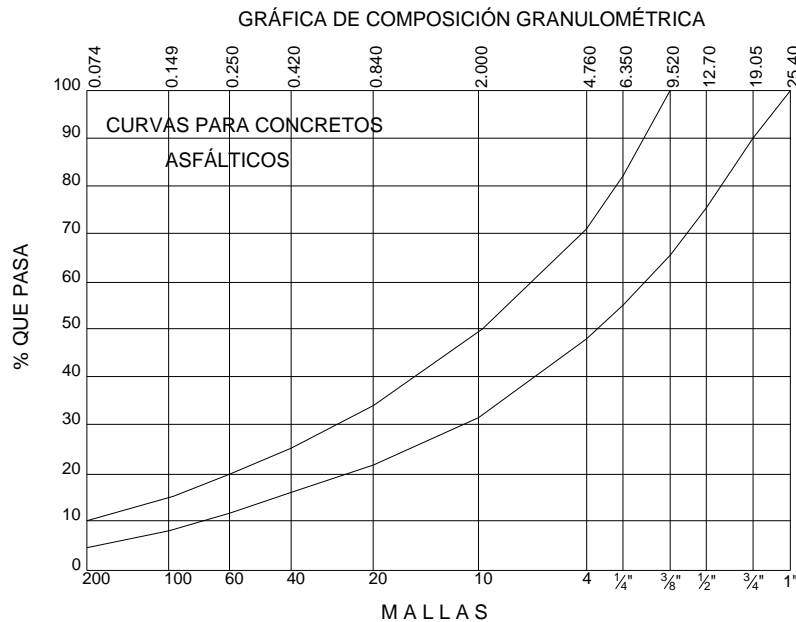


Figura 2. 7. Granulometría para concreto asfáltico (Crespo- Villalaz. 2004).



2.3.3.2 Asfaltos

Según Hewens & Oglesby (1980), existen tres tipos de asfaltos:

Asfaltos nativos

Son los que están presentes de forma natural en el ambiente, por ejemplo los asfaltos nativos de la isla de Trinidad, fuera de la costa noroeste de Venezuela, Bermúdez, Maracaibo y Cuba, reblandecidos con fluidos viscosos de petróleo, se emplearon alguna vez extensamente como aglutinantes para las superficies asfálticas. El asfalto del lago de Trinidad, cuando estaba listo para diluirse, contenía aproximadamente el 40% de materia orgánica e inorgánica insoluble, mientras que el de Bermúdez tenía aproximadamente el 6% de materia insoluble. Con el desarrollo de los asfaltos de petróleo, los asfaltos nativos han perdido importancia. De hecho, la ASSTHO Standard Specifications for Highway Materials, ya no da requerimientos para ellos.

Asfaltos de roca

Los asfaltos de roca son depósitos naturales de piedra caliza o de piedra arenisca impregnados de materiales bituminosos. Los asfaltos de roca se encuentran en varias partes de los Estados Unidos, con ellos se han hecho superficies de caminos, que en general, son extremadamente duraderas y estables, pero los altos costos de transporte han limitado las aplicaciones a las zonas generales donde se encuentran. El porcentaje de asfalto varía ampliamente entre los diversos depósitos, siendo de 4.5 y 18% en los límites. Frecuentemente el asfalto de roca, tal como se extrae de la mina, debe tratarse añadiendo agregado mineral, aglutinante asfáltico y un aceite fluxado.



Materiales asfálticos del petróleo

Los asfaltos del petróleo se utilizan primeramente en Estados Unidos para el tratamiento de caminos en el año de 1894, cuando se roció petróleo crudo de los pozos de Summerland sobre los caminos de tierra en el condado de Santa Bárbara, California. La producción de materiales de pavimentación de los petróleos crudos de California y de México fue el siguiente paso. Debe ser tomado en cuenta que solamente los hidrocarburos pesados remanentes son procesados como materiales para pavimentación. Las excepciones son los llamados “asfaltos rebajados”. Para éstos los cementos asfálticos son licuados a diferentes grados para rebajarlos a una de las fracciones más volátiles removidas anteriormente en la secuencia de producción.

Las varias clases de asfaltos de petróleo y sus características son, brevemente como siguen:

- Cemento asfáltico

Son usados como aglutinantes para casi todos los tipos finos de pavimentos asfálticos. Son hidrocarburos semisólidos remanentes después que los aceites lubricantes, así como también los combustibles, han sido extraídos del petróleo. La consistencia de los cementos asfálticos se da en términos de penetración, la distancia que una aguja estándar penetra en una muestra bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura. El grado mas blando comúnmente usado para pavimentos es el de penetración 200-300, el más duro es el de 60-70; el grado 85-100 es con mucho el más usado. Todos los cementos asfálticos son tan viscosos que ambos, agregado y aglutinante deben ser calentados antes de ser mezclados para que su colocación sea completa. (Hewes & Oglesby, 1980)

Puede describirse como un material cementoso sólido o semisólido, de color negro o café oscuro, formado principalmente por betúmenes de origen



natural que quedan como residuos en la destilación del petróleo. Se licua fácilmente por aplicación de calor y se disuelve en destilados volátiles y no volátiles del petróleo y en aceites residuales. También puede emulsificarse con agua.

El asfalto es un potente material aglutinante al que no afectan la mayoría de los ácidos y álcalis. Se adhiere con facilidad, es altamente impermeable y durable. El asfalto se vende en formas que varía desde la sólida y frágil hasta la forma líquida casi acuosa. (Hornbostel, 2002)

La mayor parte de los asfaltos que se emplean hoy en día en América provienen de la refinación del petróleo. El asfalto refinado se produce en una gran variedad de tipos desde los sólidos, duros y quebradizos hasta los fluidos casi tan líquidos como el agua. La forma semisólida conocida como *cemento asfáltico* es el material básico y puede considerarse como una combinación de asfalto duro y aceites no volátiles del petróleo. En la tabla 2.9, se presentan algunos tipos de productos obtenidos por destilación directa del petróleo crudo, ya que la destilación es el proceso principal que se emplea para obtener el asfalto del petróleo. (Crespo-Villalaz, 2004)

Tabla 2. 9. Tipos de productos asfálticos obtenidos por destilación directa del petróleo crudo. (Crespo-Villalaz, 2004).

Aceites volátiles	Aceites de volatilización lenta	Aceites no volátiles	Aceites no volátiles
Aceites de volatilización lenta			
Aceites no volátiles	Aceites no volátiles	Aceites no volátiles	Aceites no volátiles
Asfalto duro	Asfalto duro	Asfalto duro	Asfalto duro
Petróleo crudo	Aceite residual Asfáltico	Cemento asfáltico	Asfalto duro

Disolviendo el cemento asfáltico (C.A.) en diferentes destilados volátiles del petróleo, o emulsificándolo con agua, se obtienen de los *productos asfálticos* los cuales muy pronto adquieren un alto valor cementante al usarse.



A continuación se presenta la tabla 2.10 que muestra los tipos de productos asfálticos líquidos que actualmente son más empleados en los pavimentos flexibles.

Tabla 2. 10 Tipos de productos asfálticos líquidos (Crespo-Villalaz, 2004).

Aceites de volatilización lenta	Kerosina	Gasolina	Gasolina
Cemento asfáltico	Cemento asfáltico	Cemento asfáltico	Emulsor
Asfaltos de fraguado Lento	asfaltos de fraguado medio	asfaltos de fraguado rápido	emulsión asfáltica

Además de los productos asfálticos anteriores, llamados los tres primeros asfaltos rebajados, hay otros asfaltos diferentes y que a continuación se citan.

- Asfaltos rebajados:

Con el fin de poder trabajar con el cemento asfáltico a temperaturas menores, es necesario fluidificarlo; para ello se producen los rebajados y las emulsiones asfálticos. Los rebajados asfálticos se fabrican diluyendo el concreto asfáltico en gasolina, tractolina (también conocida como petróleo diáfano), diesel o aceites ligeros. En el primer caso se obtienen los rebajados de fraguado rápido, denominado FR; en el segundo caso, los rebajados de fraguado medio o FM; y por último los de fraguado lento o FL. Todos estos se pueden producir con diferentes proporciones de cemento asfáltico (de 50 a 80%) y los correspondientes solventes o “fluxes” (de 50 a 20%). De esta manera, hay cinco tipos de cada rebajado, que se numeran del 0 al 4; los que tienen gran cantidad de cemento asfáltico son los de mayor denominación y ésta disminuye a medida que aumenta el contenido de los solventes. Así, existe FR del 0 al 4, FM del 0 al 4 y FL del 0 al 4 (FL-0, FL-1, FL-4). Las especificaciones correspondientes se presentan la tabla 2.11.



Tabla 2. 11 Especificaciones para cementos asfálticos (Olivera Bustamante, 2002).

Características	Cemento asfáltico			
	Núm. 3	Núm. 6	Núm. 7	Núm. 8
-Penetración, 100g 5s, 25°C, grados	180-200	80-100	60-70	40-50
-Viscosidad Saybolt-Furol: A 135°C, s, mínimo	60	85	100	120
-Punto de inflamación (copa abierta de - Cleveland), °C mínimo	220 37-43	232 45-52	232 48-52	232 52-60
-Punto de reblandecimiento, °C	60	100	100	100
-Ductilidad, 25°C, cm, mínimo				
-Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo	99.5	99.5	99.5	99.5
-Prueba de la película delgada, 50 cm ³ , 5h, 163°C: Penetración retenida, por ciento, mínimo.	40	50	54	58
Pérdida por calentamiento, por ciento, máximo.	1.4	1.0	0.8	0.8

- Asfalto natural:

Es un asfalto que se obtiene por el proceso natural de evaporación o destilación, se forma cuando el petróleo crudo sube hasta la superficie de la Tierra a través de las grietas. Ya en la superficie, la acción conjunta del sol y el aire separa los aceites ligeros y los gases dejando un residuo que es el asfalto, lo cual generalmente está impregnado con un cierto porcentaje de arcilla o arena muy fina que se adhiere al petróleo crudo durante el trayecto ascendente por la grietas a la superficie.

- Asfalto lago:

Es un asfalto natural que se encuentra en depósitos superficiales en las depresiones de la Tierra.

- Roca asfáltica:

Es una roca porosa que se encuentra en la naturaleza con cierto grado de impregnación asfáltica.



- Gilsonita:

Es un asfalto natural duro y quebradizo que se encuentra en las hendiduras de las rocas, o en vetas de donde se extrae.

- Asfalto refinado con vapor:

Es el asfalto que se refina en presencia de vapor durante el proceso de destilación.

- Asfalto oxidado o soplado:

Es aquel asfalto al cual se le ha modificado alguna de sus características naturales, debido a que se le inyecta aire a temperatura elevada durante su destilación. Este asfalto tiene un punto de fusión más alto que el asfalto de la misma consistencia elaborado por simple destilación o evaporación.

- Asfalto refinado:

Es cualquier asfalto sometido a un proceso de refinación.

- Asfalto pulverizado:

Es el asfalto duro el cual ha sido molido hasta reducirlo a polvo.

- Mastique asfáltico:

Es una mezcla de cemento asfáltico y material mineral en proporciones tales que al calentarse se vuelve una masa espesa, la lenta fluidez que puede vaciarse y compactarse con cuchara de albañil hasta obtener una superficie lisa.

- Cemento asfáltico:

Es un asfalto refinado por destilación al vapor de los residuos más pesados del proceso de fraccionación, continuándose la destilación hasta obtener la penetración deseada.



- Emulsiones asfálticas:

Son líquidos de color chocolate casi tan fluidos como el agua y de la cual contiene entre 40% y 50% de agua, siendo este un factor importante en el conjunto. Para conseguir que el agua y el cemento asfáltico queden perfectamente emulsionados es necesario reducir el cemento asfáltico a pequeñas gotas de tal manera que queden flotando en el agua. La estabilidad de esta suspensión se logra proporcionándole a las gotas de cemento asfáltico una fuerza repulsiva que impida la unión de unas con otras, lo que trae consigo que las dos fases, agua y cemento asfáltico, se mantengan separadas. (Crespo-Villalaz,. 2004)

- Características fisicoquímicas de las emulsiones asfálticas:

El comportamiento químico de un asfalto según Crespo-Villalaz (2004) es un emulsor empleado que, generalmente es un agente químico constituido por productos tenso activos que rebajan la tensión interfasial entre agua y cemento asfáltico, y carga, a la vez eléctricamente, a las pequeñas gotas de éste (micelas) con lo que consigue que haya una repulsión entre ellas. De que este signo que recubre la micela sea positivo o negativo, nace la diferencia fundamental entre las emulsiones ácidas y las básicas (catiónicas y aniónicas).

Es conocido con frecuencia que la adherencia entre el material pétreo y el cemento asfáltico se ve afectada cuando entre ellos se interpone una película de agua, y partiendo de la base de que las emulsiones en su constitución llevan incorporadas un fuerte porcentaje de ella, puede por lo tanto existir un problema de adherencia. Sin embargo, las cargas eléctricas que recubren a las micelas de cemento asfáltico pueden favorecer dicha adherencia siempre que exista la diferencia de signos entre los áridos y las micelas. Los áridos básicos, como los calizos que están recubiertos de cargas positivas sentirán una gran atracción hacia las micelas de cemento asfáltico recubiertas con cargas eléctricas negativas, o sea hacia las emulsiones aniónicas. Por el contrario con las emulsiones aniónicas y los materiales pétreos de naturaleza árida (con cargas eléctricas negativas) no existirá atracción entre el material pétreo y el cemento asfáltico por



estar cargados ambos por el mismo signo, lo que traerá como consecuencia que en presencia de agua, ésta desplace al cemento asfáltico de la superficie del agregado pétreo.

Considerando ahora las emulsiones ácidas o catiónicas se puede observar que en ellas las micelas del cemento asfáltico están cargadas positivamente, por lo que sentirán una gran afinidad por los materiales pétreos cargados negativamente, esto es, por los materiales pétreos ácidos como las cuarcitas y los silíceos, con los cuales la adherencia queda asegurada. Lógicamente con los materiales pétreos básicos tendría que suceder que la adherencia no fuera buena, pero como el agente emulsor empleado en la fabricación de éstas emulsiones contiene ácido se produce una reacción química entre éste y el carbonato cálcico de los materiales pétreos básicos, apareciendo entonces en la superficie del material pétreo aniones que aseguren la atracción entre el material pétreo y el cemento asfáltico.

En el momento que las partículas de cemento asfáltico son atraídas por la superficie del material pétreo, la emulsión deja de mantenerse estable y rompe, quedando el cemento asfáltico incorporado en forma de película fina al material pétreo y el agua queda libre para que se evapore posteriormente. No ocurre lo mismo cuando se emplean emulsiones que rompen principalmente por deshidratación, lo que es causa de que en tiempo frío o húmedo, el tiempo de curado de la misma se prolongue excesivamente.

Como puede observarse las emulsiones catiónicas son insustituibles para ejecutar trabajos fuera de temporada. Sin embargo, es muy necesario tener en cuenta el cemento asfáltico que se emplee en su fabricación, ya que por la rápida ruptura de estas emulsiones podrían dar lugar a superficies cubiertas en forma insuficiente lo que sería un riesgo para la vida de la carpeta asfáltica. Por ello, en la actualidad, las emulsiones se preparan con un cemento asfáltico fluidificado que permite una vez rota la emulsión disponer del cemento asfáltico con una



viscosidad apta para trabajar durante un periodo de tiempo mayor que si se empleara al cemento asfáltico puro. Según que la emulsión se vaya a emplear en riegos o en mezclas, la proporción de fluidificante tendrá que ser mayor o menor para que al efectuar con ellos los trabajos, se realicen con las debidas seguridades.

2.3.4 Estado actual y futuro de los pavimentos

El estado actual y futuro de la tecnología de los pavimentos se enfrenta a grandes retos debido a que se están presentando nuevas condiciones y necesidades, derivadas de las características impuestas por escenarios sociales, económicos y tecnológicos en que se desarrolla la vida moderna.

Un aspecto muy interesante es el originado por los importantes incrementos en el número y en el peso de los vehículos de mayor carga, así como en los avances de la industria automotriz. Esto ha generado la necesidad de introducir nuevos materiales, más resistentes y durables, así como nuevas estructura o tipos de pavimentos lo que además, exige mejores modelos matemáticos que consideren la presencia de tales materiales en el diseño de los pavimentos. Entre los nuevos materiales pueden mencionarse los concretos asfálticos de alto módulo, los geo textiles, así como los agentes modificadores, y entre las nuevas tecnologías, los conceptos reológicos de los materiales, los módulos de elasticidad y dinámicos.

Por otra parte, el citado incremento del tránsito pesado en el sistema carretero principal, hará necesario reforzar los pavimentos existentes, construir sobrecarpetas asfálticas o concreto hidráulico sobre pavimentos flexibles antiguos o implementar técnicas de reciclado o recuperación de los pavimentos existentes.

Con respecto a la interacción del pavimento con el usuario, debe mencionarse que éste se ha vuelto más exigente, y sus umbrales de aceptación son más altos, lo cual modificará los estándares de calidad actuales, de manera



que los que ahora parecen niveles de excelencia, en poco tiempo serán considerados de nivel medio. Se deberá dar importancia a las características superficiales del pavimento que controlan la comodidad, la resistencia al derramamiento, el desgaste de las llantas y del automotor. En este último aspecto, se deben controlar los niveles de ruido y contaminación ambiental en el entorno, con disposiciones y medidas de mayor cobertura.

En lo que se refiere a los materiales, hay que hacer notar que deberán también quedar sujetos a mejores controles y estándares de calidad, requiriéndose la aplicación de los conceptos de calidad total y aseguramiento de la misma. Un aspecto que hoy por hoy preocupa es el consumo de energía para la producción de los materiales y de su puesta en obra, por los que se efectúan análisis tanto de su costo como de la energía consumida al obtenerlos. De igual manera, se investigan las condiciones de su comportamiento a largo plazo, lo que da lugar a la elaboración de especificaciones que toman en cuenta esta propiedad. Ante la carencia de su calidad, se investiga también sobre la utilización de elementos fuera de especificaciones, o alternativos y técnicas de reciclado. Este aspecto se encuentra muy ligado al problema de refuerzo de los pavimentos antiguos, que se han incrementado dadas las cargas y sus repeticiones, por lo que deben desarrollarse técnicas de evaluación, análisis y diagnóstico, así como aquellas referidas al diseño del refuerzo necesario para ciclos de vida adicionales.

En el campo de la construcción también ha habido y habrá cambios importantes. Los equipos y maquinaria son más potentes y versátiles; se ha desarrollado el concepto de máquinas inteligentes, con cada vez mayor participación de la electrónica y la robotización y menor utilización de la mano de obra, así como el empleo de dispositivos más sensibles que permitan obtener mejores condiciones de acabado superficial. Es importante destacar, en el aspecto constructivo, que se debe definir adecuadamente la logística de la obra, para evitar interrupciones en la secuencia de la construcción, dado el efecto negativo



que tienen sobre las condiciones superficiales del pavimento, en su calidad general y en su costo. (Zarate Aquino, 2003)

2.4 Tipos de mezclas asfálticas

2.4.1 Definición

Una mezcla asfáltica es la combinación de una material asfáltico y agregados minerales pétreos, la cual debe ser durable, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el desprendimiento de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, a la abrasión inducida por el tránsito diario, debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y a su vez deberá ser trabajable para su fácil colocación y compactación en obra. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

2.4.2 Clasificación

De acuerdo al procedimiento de mezclado, las mezclas asfálticas se clasifican en:

2.4.2.1 Mezclas asfálticas en caliente

Como su nombre lo indica son mezclas elaboradas en caliente a una temperatura superior a los 100 °C, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta la cual puede ser estacionaria o móvil provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla, en la tabla 2.12 se especifican las temperaturas de mezclado para mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 2. 12 Temperaturas de mezclado para mezclas en caliente N-CMT-05-003/02

Clasificación de cemento asfáltico	Temperatura de mezclado en °C
AC-5	120-145
AC-10	120-155
AC-20	130-160
AC-30	130-165



En el uso de este tipo de mezclas se debe tener especial cuidado al momento de transportarla ya que si la temperatura especificada disminuye se tendrán serios problemas al momento del tendido y compactación en el sitio. A su vez estas mezclas se clasifican en:

2.4.2.2 Mezclas asfálticas de granulometría densa

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea. Elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con un tamaño nominal entre 37,5 milímetros (1 ½ in) y 9,5 milímetros (3/8 in), los cuales deben satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), este tipo de mezclas se utilizan normalmente en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los cuales se requiere una alta resistencia estructural o en re nivelaciones y refuerzos de pavimentos ya existentes.

2.4.2.3 Mezcla asfáltica en frío de granulometría abierta

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 12,5 milímetros (1/2 in) y 6,3 milímetros (1/4 in) los cuales deben satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), estas mezclas se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que es impulsada hacia los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. No es recomendable colocar estas



mezclas en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de 600 milímetros por año. En el caso de la ciudad de Querétaro no se justifica el uso de este tipo de mezclas, ya que la precipitación anual es de 500 a 550 milímetros.

2.4.2.4 Mezcla asfáltica de granulometría discontinua o tipos SMA

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve coma cero (19,0) milímetros ($\frac{3}{4}$ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros ($\frac{3}{8}$ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la norma N-CMT-4-04, Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macro textura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

2.4.2.5 Mezclas asfálticas en frío

Son las mezclas asfálticas elaboradas en frío, en una mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas (mezcla de asfalto y emulsificantes que con el agua forman una emulsión estable que permite tender la carpeta asfáltica) o asfaltos rebajados y materiales pétreos. Este tipo de mezclas es aplicable principalmente a caminos secundarios en los que la carga vehicular es baja y de poco peso.

A su vez este tipo de mezclas se clasifican de la siguiente manera:



2.4.2.6 Mezcla asfáltica en frío de granulometría densa

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre 37,5 milímetros (1 ½ in) y 9,5 milímetros (3/8 in), los cuales deben satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Estas mezclas normalmente se utilizan en los casos en que la intensidad del tránsito (ΣL) es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiere de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches.

2.4.2.7 Mortero asfáltico

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 2,36 milímetros (N°8) la cual debe satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), este tipo de mezclas se coloca normalmente sobre una base impregnada (riego de impregnación y riego de liga) o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

2.4.2.8 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos

Son las mezclas que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes, que según su denominación, satisfagan los requisitos de la Norma N-CMT-4-04 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Este tipo de mezclas se clasifican en carpetas de uno, dos o tres riegos, pueden ser premezclados o no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica nueva o existente como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimiento.



A continuación se describe cada uno de los tres tipos de este tipo de mezclas:

a) Carpetas por el sistema de riegos

Consiste en una serie de capas sucesivas de productos asfálticos y pétreos sobre la base impregnada. La forma de construir las carpetas por riegos es la siguiente:

Sobre la base impregnada, se da un primer riego de producto asfáltico que se cubre con un riego de material pétreo grueso; por medio de una compactadora de rodillo liso de 10 ton se acomoda y se hacen tres cubrimientos de la superficie. En seguida, se repite toda la operación, solo que el material pétreo debe ser de dimensiones menores que el usado antes. Después se repite la operación con el material pétreo más fino; es decir, se da un riego de asfalto fluidificado, se riega el material pétreo y se acomoda con un rodillo liso. Se deja una semana para que fragüe el producto asfáltico (es decir, que se evaporen los solventes) y, después de un barrido manual o mecánico, se retira el material fino que no esté adherido al resto de la estructura. Esta parte del proceso es muy importante para evitar contratiempos a los usuarios, pues cuando no se hace o se realiza mal, se pueden causar daños materiales a los usuarios con las partículas que expelen hacia atrás las llantas de los vehículos.

El tipo de carpeta construida según especificaciones se denomina de tres riegos y los materiales pétreos que se utilizan tienen granulometría uniforme, es decir, su gama de tamaños es corta. Estos materiales se clasifican en los siguientes: el material 1 es el más grueso y su gama de tamaños es de 2.54 mm (1 pulg) a 6.35mm (1/4 pulg); el material 2, de tamaño intermedio, varía de 12.7 mm (1/2 pulg) a 2.38 mm (núm. 8); y el material 3, el más fino, tiene una granulometría de 9.51mm (3/8 pulg.) a 0.42 mm (núm. 40). Las especificaciones completas para la granulometría se ven en la tabla 2.13.



Tabla 2. 13 Especificaciones para materiales pétreos que se emplean en carpetas asfálticas por el mismo sistema de riegos de sellos (material 3) (Olivera Bustamante, 2002).

Denominación de material pétreo	Por ciento que pasa la malla										
	50.8mm (2")	38.1mm (1.5")	32.0mm (1.25")	25.4mm (1")	19.0mm (3/4")	12.7mm (1/2")	9.51mm (3/8")	6.35mm (1/4")	4.76 mm (#4)	2.38mm (#8)	0.42 mm (#40)
1			100	95 min		5 máx.		0			
2					100	95 mín.		5 máx.		0	
3-A							95 mín.			5 máx.	0
3-B							100	95 mín.		5 máx.	0
3-E						100	95 mín.		5 máx.	0	

También hay carpetas de uno y de dos riegos cuyo procedimiento de construcción es semejante, pero se omiten uno o dos de los ciclos mencionados: el correspondiente al material 1 para la carpeta de 2 riegos y de los materiales 1 y 2 para la de un riego. Las cantidades aproximadas de material pétreo y cemento asfáltico se muestran en la tabla 2.14.

Los productos asfálticos que se utilizan en estas carpetas de riego son: rebajado de tipo FR-3 y emulsiones de fraguado medio; en la figura 2.14, se dan las cantidades necesarias de cemento asfáltico para calcular la cantidad de producto líquido. Se divide la cantidad escogida entre el porcentaje en decimal de la cantidad de cemento asfáltico que contiene el producto que se habrá de utilizar, de acuerdo con la prueba de destilación correspondiente. La cantidad apropiada en cada caso depende de la densidad y absorción del material pétreo, así como del tipo de producto asfáltico que se piensa utilizar. Lo conveniente es hacer tramos de pruebas, variando las cantidades entre los rangos recomendados en la tabla 2.14 y elegir las proporciones que se comporten mejor.



Tabla 2. 14 Cantidades de material pétreo y cemento asfáltico que se recomiendan para construir carpetas por el sistema de riegos. Para conocer la cantidad de asfalto rebajado o emulsificado, la cantidad de cemento asfáltico se divide entre el porcentaje de este material contenido en el producto asfáltico y es el resultado de una prueba de destilación (Olivera Bustamante, 2002).

Carpetas	Materiales	1 ^a capa (1/m ²)	2 ^a capa (1/m ²)	3 ^a capa (1/m ²)
3 riegos	Cemento asfáltico pétreo	0.6 - 1.1 #1: 20-25	1.1 – 1.4 #2: 8-12	0.7 – 2.0 #3: 6-8
2 riegos	Cemento asfáltico pétreo	0.6 - 1.0 #2: 8-12	0.8 – 11 #3: 6-8	
1 riego	Cemento asfáltico pétreo	0.6 - 1.0 #3: 8-11		

b) Carpeta asfáltica de mezclas en el lugar frío

Para elaborar las mezclas asfálticas en el lugar, se utilizan materiales pétreos de granulometría continua, las normas establecen dos zonas que se muestran en la tabla 2.15; La granulometría del pétreo debe tener una forma similar a las que marcan las fronteras entre zonas. El material pétreo se mezcla a la temperatura ambiente y es factible utilizar en la mezcla: rebajado asfáltico FR-3 (que se calienta a la temperatura adecuada) o emulsión de fraguado medio; asimismo, la mezcla se puede efectuar con motoconformadoras o mezclas semifijas.

El procedimiento constructivo de este tipo de carpetas es el siguiente: se buscan bancos de material adecuado para la carpeta, si se trata de un banco de roca firme o de conglomerados se tendrá que utilizar explosivo y se extraerá con palas frontales o mecánicas, sino es así será con palas manuales. A los materiales pétreos se les aplicarán tratamientos previos que podrían ser cribados o triturado, para posteriormente ser transportados al lugar de la obra.



Tabla 2. 15 Constantes de área para encontrar el porcentaje de contenido mínimo de cubrimiento total, con base en la granulometría del material pétreo. (Olivera Bustamante, 2002).

Material que se retiene		Constante de área m ² /kg
Pasa malla	En malla	
38.1 mm (1 ½")	19.05 mm (¾")	0.27
19.05 mm (¾")	Núm. 4	0.41
Número 4	Núm. 40	2.05
Número 40	Núm. 200	15.38
Número 200		53.33

Una vez calculada la cantidad de asfalto para regarse en un tramo de longitud determinada, el material pétreo se va abriendo con la motoconformadora en una parte de la corona; sobre el material, se riega asfalto por medio de una petrolizadora. La motoconformadora abre de nuevo el material pétreo y la petrolizadora riega otra parte de asfalto calculado, este procedimiento vuelve a realizar hasta que se incorpora todo el asfalto necesario, en pasadas completas de la petrolizadora. A partir de este momento, la motoconformadora empieza a mezclar el material pétreo y el asfalto, al pasarlo de un lado a otro de la corona hasta homogeneizar por completo el asfalto. Si el contenido de solventes en la mezcla es mayor que 0.09 respecto a la cantidad de cemento utilizado, la mezcla se sigue moviendo con la motoconformadora hasta que el contenido esté debajo de ese valor. Después de lograr lo anterior, sobre la base impregnada y barrida, se da un riego de liga con rebajado asfáltico FR-3 en proporción de 0.7L/m²; de inmediato se extiende la mezcla sobre la corona con un espesor constante. Para no segregar materiales, conviene acamellonar toda la mezcla hacia el centro y extenderla poco a poco hacia las orillas, con la motoconformadora a baja velocidad.

Ya extendida la mezcla, se compacta; para ello es factible utilizar rodillos neumáticos, o lisos, o ambos, con pesos de 8 a 15 ton, hasta alcanzar 95% del peso volumétrico de la prueba Porter estándar. Al final de la compactación, se



borran las huellas de los neumáticos por medio de un rodillo liso que cierre a media rueda toda la superficie compactada.

c) Carpetas de concreto asfáltico

Las carpetas de concreto asfáltico son mezclas de materiales pétreos y cemento asfáltico recubierto. Como este último es sólido a temperatura ambiente, es necesario calentarlo en una planta hasta 140°C; por consiguiente, el material pétreo también se calienta, a una temperatura de 160°C.

Debido a las características del cemento asfáltico, éste tipo de carpetas tiene propiedades elásticas, con ruptura de tipo frágil y de poca resistencia principalmente a temperaturas bajas. Este tipo de carpetas no deben de construirse sobre bases naturales con módulos de elasticidad bajos que pueden tener deformaciones por la acción del tránsito, sino que es preciso construirlas sobre bases rigidizadas o sobre bases asfálticas.

En general, el material pétreo utilizado en este caso es roca triturada de basalto, andesita o reolita, aunque también puede provenir de bancos de grava-arena, minas y playones río o arroyo; de estos dos últimos tipos conviene que tengan bastante desperdicio por triturar, pues muchas veces son materiales redondeados, y la mezcla no pasa las normas de resistencia; pero al triturarlos se producen superficies rugosas que mejoran su calidad.

El procedimiento constructivo para este tipo de carpetas se basa generalmente en el diseño Marshall para obtener un contenido de asfalto óptimo de acuerdo a la granulometría del pétreo, con la que también se calibra el abastecimiento de la planta mezcladora.

En la planta de mezclado se realiza un primer proporcionamiento aproximado de pétreos en frío, por medio de cargadores frontales o de las compuertas de las tolvas, auxiliadas de bandas. Este proporcionamiento se hace



para que no haya posibilidad de suspender el mezclado por falta de un material de algún tamaño. Por medio de elevadores de cangilones, el material se lleva al cilindro de calentamiento y de secado; aquí, el pétreo se calienta de 150°C a 170°C. En esta etapa, la planta produce una gran cantidad de polvo que va a la atmósfera, a no ser que haya un equipo especial de captación (en la actualidad obligatorio) para evitar la contaminación del aire. Ya con la temperatura necesaria, el pétreo se eleva otra vez con cangilones a la unidad de mezclado, en donde, en primer término, se hace un cribado para alimentar a tres o cuatro tolvas con material de diferentes tamaños. La cantidad necesaria de pétreos para cada tolva se pesa y se deposita en la caja mezcladora, en donde se provee el cemento asfáltico a una temperatura de 130°C a 140°C. La mezcla se realiza hasta su homogeneización completa y se vacía al equipo de transporte o a un silo de almacenamiento provisional.

Existen dos tipos de plantas: de producción discontinua o de “bachas” y de producción continua. En la primera el pétreo y el asfalto se depositan en una caja a la temperatura necesaria y, por medio de aspas, se realiza la mezcla hasta homogeneizarla; en general, para llenar un camión, se requiere de tres a cuatro ciclos de mezclado. En la segunda planta, el material pétreo y el asfalto se proporcionan de forma continua, en un canal donde hay un tornillo sinfín de tal longitud que al final se tiene la mezcla homogénea y la producción se presenta de manera constante.

La mezcla se transporta al tramo, a donde debe llegar a una temperatura de 110 a 120°C; para ello, si es necesario se cubre con lonas durante el trayecto. Antes de colocar la mezcla, se da un riego de liga de FR-3 sobre la base impregnada, en proporción de 0.7 L/m². Al llegar el equipo de transporte al tramo, descarga su contenido en la máquina extendedora (finisher), que forma una franja de mezcla asfáltica para evitar segregaciones de material y darle una ligera compactación. Al terminar de vaciarse el camión el tren de extendido se para y luego, al ensamblarse el siguiente, se reanuda el trabajo; así, entre vehículo y



vehículo hay una junta donde puede haber una discontinuidad, que evita o reduce un equipo de cuatro a seis rastrillos por extendedora, cuya misión también es asegurar una textura conveniente en la superficie y borrar, las juntas longitudinales entre las franjas. A una temperatura mayor de 90°C, se inicia la compactación de la franja; al principio se utiliza un rodillo de aproximadamente 7 toneladas, para dar un primer armado y permitir después la entrada de equipo con un peso de más o menos 15 toneladas, el cual no se usa desde el principio porque produce el desplazamiento de la mezcla. Es posible utilizar rodillos lisos o neumáticos y al final se borran las huellas de la compactación con un rodillo liso. El grado de compactación debe ser de 95% como mínimo respecto al peso volumétrico, que no necesariamente corresponde al grado máximo; para conocer este grado de compactación, se extraen corazones con máquinas rotatorias.

2.5 Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla.

En la actualidad se conocen dos métodos para el diseño de mezclas asfálticas los cuales son:

1. Método de Marshall
2. Método de Hveem

En México el método más utilizado es el método de Marshall, especificado en la Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), motivo por el será utilizado para elaboración y diseño de nuestras mezclas asfálticas, así como también descrito a continuación:



2.5.1 Método de Marshall

El método Marshall está limitado al proyecto y control de elaboración de mezclas asfálticas hechas en planta estacionaria, en caliente, utilizando cemento asfáltico. Mediante este método se determinan los valores de estabilidad y de flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado y probados a 60 °C. El valor de estabilidad se determinará midiendo la carga necesaria para producir la falla del espécimen, aplicada en sentido normal a su eje. La deformación vertical producida en el espécimen por dicha carga será el valor del flujo. El valor de la estabilidad expresa la resistencia estructural de la composición granulométrica y el tipo del agregado. El valor de flujo representa la deformación requerida, en el sentido del diámetro del espécimen, para producir su fractura. Este valor es una indicación de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica y, consecuentemente de la resistencia ofrecerá la carpeta a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos.

El equipo necesario para la elaboración y prueba de los especímenes es el siguiente:

- Molde de compactación, provisto de un collarín y de una placa de base
- Sostén del molde de compactación, provisto de un collarín y de placa base
- Pisón de compactación con superficie circular de apisonado de 98.4 mm de diámetro, equipado con una pesa deslizante de 4.536 kg, cuya altura de caída es de 45.7 cm
- Máquina de compresión Marshall
- Medidor de flujo
- Tanque de saturación
- Hornilla eléctrica para calentar agregados
- Charola de lámina
- Cucharones de lámina
- Termómetro



- Balanza con capacidad de 20 kg
- Espátula

Con relación a la elaboración de los especímenes se consideran los siguientes aspectos:

Fijada la granulometría de la mezcla asfáltica, se determina el porcentaje en peso de los siguientes tamaños en que ha sido separado previamente el material pétreo, de acuerdo a la Norma N-CMT-4-04-01 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). Para cada contenido de asfalto se fabricarán tres especímenes, cada uno de estos requiere aproximadamente 12200 gramos de agregado pétreo. Se tomará cada uno de los tamaños mencionados la cantidad de muestra que resulte de multiplicar el porcentaje en peso de cada fracción por el peso total de la muestra. Las fracciones ya pesadas se mezclarán previamente a la adición del cemento asfáltico. La cantidad de cemento asfáltico que deba agregarse a cada muestra se calculará sobre la base del contenido mínimo de asfalto. Estas cantidades de cemento asfáltico, expresados en relación al peso del material pétreo:

Contenido calculado -1%

Contenido calculado neto

Contenido calculado +0.5%

Contenido calculado +1.0%

Contenido calculado +1.5%

Contenido calculado +2.5%

Se mezclarán los agregados y el cemento asfáltico, calentados previamente a las temperaturas de 175 °C y 120 °C respectivamente, hasta obtener una distribución uniforme del asfalto. La temperatura de la mezcla no deberá ser menor que 100°C al momento de elaborar el espécimen. En ningún caso la mezcla deberá ser recalentada.



Para compactar la mezcla asfáltica se procederá en la forma siguiente: el pisón de compactación y el molde se calentarán en un baño de agua hirviendo. Una vez caliente se sacará el equipo del baño y se colocará papel filtro en el fondo del molde y se llenará éste con la mezcla caliente. Se apoyará el pisón sobre la mezcla y se aplicarán 50 golpes con la pesa deslizante. La cara del pisón será metida paralelamente a la base del molde durante el proceso de compactación. Se quitará el collarín y se invertirá la posición del molde; se colocará el collarín y se aplicarán otros 50 golpes en el espécimen. El procedimiento de compactación antes descrito se aplicará al estudio de mezclas asfálticas proyectadas para recibir presiones de contacto que no excedan 7 kg/cm^2 . El número de golpes en cada cara del espécimen deberá aumentarse a 75 cuando la mezcla se proyecte para recibir presiones de contacto comprendidas entre 7 y 14 kg/cm^2 . Se removerá el collarín y la placa base y, el molde con su contenido se sumergirá en agua fría por un tiempo de 2 minutos. Se extraerá el espécimen del molde, se identificará y se dejará enfriar a temperatura ambiente durante 12 a 24 horas. Los especímenes compactados deberán tener una altura de 63,5 mm con una tolerancia de 3,2 mm, y en otro caso deberá repetirse el proceso.

La prueba de los especímenes comprende la determinación del peso volumétrico y de los valores de estabilidad y flujo. Los valores de estabilidad y de flujo se obtendrán ensayando los especímenes en la máquina de Marshall, siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

Se sumergirá el espécimen en el tanque de saturación con agua a temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y se mantendrá en esa condición durante un periodo de 20 a 30 minutos. Mientras los especímenes se encuentran en el tanque de saturación se limpiará la superficie del anillo seleccionado y se lubricarán los postes de guía de la manera que la sección superior del anillo deslice libremente; se ajustará a cero el extensómetro del anillo de carga. Terminando el proceso de inmersión, se sacará el espécimen del tanque y se secará la superficie. Se colocará el espécimen entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centrará el



conjunto en la máquina de compresión (figura 12). Se colocará el medidor de flujo en el poste guía y se ajustará a cero su caratula. Se aplicará la carga al espécimen a una velocidad constante de 50 mm por minuto hasta que la falla del espécimen ocurra. La carga máxima aplicada para producir la falla del espécimen a 60 °C, se deberá registrar como el valor de la estabilidad Marshall. Mientras la prueba se lleve a efecto se deberá sostener firmemente el medidor del flujo del poste guía y se removerá tan pronto como se haya aplicado la carga máxima, anotándose la deformación sufrida por el espécimen, esta lectura en mm expresa el valor de flujo. Se promediarán los valores de estabilidad y de flujo de los tres especímenes elaborados con el mismo contenido de asfalto, debiendo desecharse para el cálculo el valor que discrepe notablemente. La prueba anteriormente descrita deberá complementarse en un periodo de 30 segundos, contados a partir del momento en que los especímenes sean sacados del tanque de saturación, se corregirán los valores de estabilidad de los especímenes que no tengan la altura especificada de 63.5 mm, multiplicando los valores por los factores de corrección que se indican en la tabla 2.16.

Tabla 2. 16 Factores de corrección de la estabilidad Marshall con respecto a la altura obtenida al elaborar los especímenes.

Altura del espécimen, mm	Factor de corrección	Altura del espécimen, mm	Factor de corrección
55.0	1.27	63.5	1.00
56.0	1.23	64.0	0.98
57.0	1.20	65.0	0.96
58.0	1.16	66.0	0.94
59.0	1.13	67.0	0.92
60.0	1.10	68.0	0.90
61.0	1.07	69.0	0.88
62.0	1.04	70.0	0.86
63.0	1.01	71.0	0.84



Figura 2. 8 Espécimen colocado entre las dos secciones de la cabeza de prueba Marshall.

2.5.2 Método de Hveem

En un material pétreo graduado al que se le han incorporado diferentes cantidades de asfalto, la resistencia ofrecida por las mezclas ya compactadas a los esfuerzos laterales que se provocan al aplicarse una carga vertical, es función de la cantidad y tipo de asfalto incorporado a la mezcla y del acomodo y características de las partículas de material pétreo. La mezcla asfáltica compactada dentro de un molde, transmite a este lateralmente una fracción de la presión vertical aplicada. Dicha presión lateral varía inversamente con la resistencia interna de la mezcla, y si se cuenta con dispositivos para medir aquella, se tendrá una indicación de su resistencia y estabilidad. Por medio del estabilómetro de Hveem se miden dichas presiones laterales, para determinar el porcentaje de estabilidad correspondiente a la mezcla ensayada. Los porcentajes de estabilidad varían de 0 a 100, en donde el valor de 0 corresponde a un estado semejante al líquido, en el cual la presión aplicada se transmite lateralmente en igual magnitud. El valor de 100 corresponde a un cuerpo rígido que no transmite presión lateral. De acuerdo con los conceptos antes enunciados, es evidente que,



para evitar que las carpetas de mezcla asfáltica se desplacen bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos, es necesario que presenten cierta resistencia a la deformación plástica, la cual queda fijada por el porcentaje mínimo de estabilidad, que será de 30 para tránsito ligero y de 35 para tránsito intenso.

Puede presentarse el caso de que la mezcla asfáltica compactada satisfaga los requisitos mínimos de estabilidad requeridos, pero que cohesión o resistencia a los esfuerzos de tensión sea muy bajo, debido a las características del producto asfáltico utilizado en su elaboración. Es evidente que las mezclas elaboradas con cementos asfálticos de baja penetración, presenten características de dureza diferente a aquellas en que se utilizó un asfalto rebajado de fraguado medio, pongamos por caso. Para evaluar esta característica se hace uso del cohesiómetro, dispositivo con el cual se mide la resistencia cohesiva de la película asfáltica que recubre al agregado pétreo, sujetando a un esfuerzo de flexión al mismo espécimen utilizado para medir la estabilidad. El valor obtenido con el cohesiómetro deberá ser igual o mayor de 50 para cualquier tipo de tránsito. La prueba de expansión es un índice de la resistencia de una mezcla asfáltica compactada y la desintegración provocados por el agua. El valor máximo permitido para la expansión es de 76 centésimos de milímetro. El contenido óptimo de asfalto será el porcentaje máximo que admita la mezcla sin perder estabilidad, y se definirá por medio de la curva porcentaje de asfalto-estabilidad. Si el valor del cohesiómetro es relativamente bajo, puede incrementarse dicho valor haciendo ajustes en la composición granulométrica del material pétreo, o bien utilizando un asfalto de mayor dureza, hasta alcanzar el valor mínimo señalado.

Hveem desarrolló el estabilómetro, un triaxial especial que utiliza probetas de 101.6 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, preparadas con ayuda de compactador especial, el “kneading compactor” o compactador por amasado. Figura 2.13.

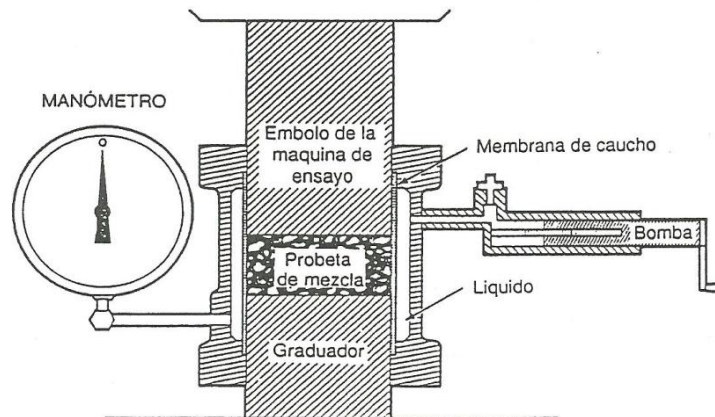


Figura 2. 9 Ensayo Hveem

Con la siguiente ecuación se puede calcular la estabilidad Hveem:

$$S = \frac{2.22}{\left[\frac{P_h \cdot D}{P_v - P_h} \right] + 0.222}$$

Donde:

S: Estabilidad Hveem

P_v: presión vertical (kg/cm²)

P_h: presión horizontal (kg/cm²)

D: número de vueltas de la bomba manual

2.6 Normatividad

El material pétreo que se utilice en la elaboración de carpetas asfálticas de granulometría densa, con mezcla en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y de intensidad del tránsito esperado en términos del números de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con las características de calidad establecidas en la Normas correspondientes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT,2008), las cuales se describen a continuación:



2.6.1 Granulometría

La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretenda emplear en la elaboración de carpetas asfálticas, es de primordial importancia porque en función de ella se puede conocer de antemano qué clase de textura tendrá la carpeta.

La prueba granulométrica se ejecuta de la siguiente manera: Se pesa una determinada cantidad de material obtenida por cuarteos de la muestra representativa y se pasa por las mallas de diferentes aberturas, anotándose los retenidos en cada malla. Se calcula el retenido parcial con respecto a la muestra ensayada. Después se calculan los porcentajes acumulativos y luego los porcentajes pasando. Con estos últimos se dibuja la curva granulométrica del material empleando un eje de las ordenadas, a escala aritmética, los porcentajes pasando y en el eje de las abscisas, a escala logarítmica, las aberturas de las mallas. Observando en qué zona de granulometría cae el material ensayado, según lo mostrado por las especificaciones, se puede decir si el material está bien o mal graduado y qué textura tendrá la carpeta que se elabore con dicho material.

Los materiales pétreos utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa, para un pavimento con un valor de $\sum L$ mayor a un millón de ejes equivalentes, deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla 2.17 (N-CMT-4-04-01, SCT).

2.6.2 Densidad relativa de materiales pétreos

El objetivo de conocer la densidad relativa de materiales pétreos es para conocer la masa de los sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua o en este caso respecto a la densidad de cemento asfáltico.



Tabla 2. 17 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa para ΣL mayor a 10^6

Malla		Tamaño nominal del material pétreo, mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/8")	12,5 (1/2")	19,05 (3/4")	25 (1")	37,5 (1 1/2")
		Porcentaje que pase				
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
1,5	1/2"	100	90-100	72-90	58-71	46-60
9,5	3/8"	100-90	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	25-34
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

En este caso la densidad relativa del material que nos interesa es con respecto al asfalto y ésta se aplica a los materiales que se utilizan en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, principalmente cuando tiene absorción mayor de 2.5%, y se efectúa tanto en la fracción retenida en la malla número 4, como en la que pasa dicha malla o bien, en la combinación de ambas fracciones; esta prueba no deberá hacerse e materiales finos que pasan la malla número 100. La principal aplicación de los resultados obtenidos con esta determinación es en el cálculo del porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas compactadas. (Campos Hurtado, 2011)



El procedimiento para llevar a cabo dicha prueba es como se describe a continuación: Se criba el material por la malla N° 4 y se obtiene dos muestras de 1 kg cada una ya sea del material retenido en dicha malla o del material que pasa. Esto si se desea hacerlo así o podrían determinarse la densidad del material con su granulometría completa.

Teniendo la muestra de cemento asfáltico; se le aplica calor para fluidificar y se vierten 6 kg aproximadamente en un recipiente con capacidad de 8 litros.

Una de las muestras de material pétreo se coloca en una charola y se mete al horno para cercarla a peso constante a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, posteriormente se saca del horno dejándola enfriar hasta alcanza una temperatura ambiente para pesarla y obtener el peso seco que se registra con W_p .

Al mismo tiempo que el material pétreo se seca, el cemento asfáltico se calienta a una temperatura de $138^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ y en un recipiente de 4 lt aproximadamente se vierte cemento asfáltico ocupando éste una tercera parte del recipiente, al tener esto se introduce una varilla al cemento para agitarlo durante un minuto y se deja enfriar a temperatura ambiente. Se determina el peso sumergido de este recipiente con la varilla y se registra como W'_a . Teniendo registrados los pesos W_p y W'_a , se vuelven a meter al horno el material asfáltico y el material pétreo el tiempo necesario para que los dos alcancen una temperatura de $138^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Al haber alcanzado dicha temperatura los materiales se sacan del horno y el material pétreo se vierte en el material asfáltico, mezclándose con la varilla durante 2 minutos. Esta mezcla se deja enfriar hasta alcanzar una temperatura ambiente y si en este periodo de enfriamiento se notan burbujas de aire en la superficie, se pasa una flama sobre esta para eliminarlas.

Inmediatamente después de obtiene el peso del recipiente conteniendo el asfalto y el material pétreo, sumergido en agua y se registra este peso como W'_{ap} .



Para calcular la densidad relativa de material pétreo utilizamos la siguiente ecuación:

$$S_p = \frac{W_p}{W_p - (W'_{ap} - W'_a)}$$

Donde:

S_p = Densidad relativa de material pétreo

W_p = Peso seco de material pétreo

W'_{ap} = Peso sumergido del cemento asfáltico y material pétreo

W'_a = Peso sumergido de cemento asfáltico

2.6.3 Desgaste “Los Ángeles”

Esta prueba tiene por objeto conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste ya sea por el grado de alteración del agregado, por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste esto de acuerdo al autor (Crespo-Villalaz, 2004). Cuando se trata de analizar el desgaste de piedras en trozos se emplea la máquina *Deval*, pero cuando se trata de agregados se emplea la máquina *Los Ángeles*, denominándose al resultado *Desgaste los ángeles*. La prueba se ejecuta de la siguiente manera: La muestra a ensayar se lava para eliminar el polvo que tenga adherido y luego se seca a peso constante en un horno y después se criba a través de las mallas 3”, 2.5”, 1.5”, 1”, ¾”, ½”, #3, #4, #8 y #12 para conocer su graduación. Luego se emplea una cantidad determinada de cada tamaño para ejecutar la prueba, así como el peso en kg de la carga abrasiva y número de revoluciones que deberá darse a la máquina. La muestra seleccionada se pesa (P_1), se coloca junto con las esferas de la máquina y se hace girar hasta completar las revoluciones especificadas. Se saca la muestra de la máquina y se lava a través de la malla #12 secando el retenido de ésta en un horno y se pesa (P_2). La pérdida por desgaste será:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$



2.6.4 Forma de partículas

Respecto a la forma de la partícula (Zárate-Aquino, 2007) considera que estos aspectos constituyen factores fundamentales en la resistencia y el comportamiento futuro del pavimento. La resistencia de los materiales granulares depende de la propia del esqueleto mineral, y ésta a su vez, depende de la fricción interna, lograda por el contacto intergranular de las partículas, la aspereza superficial y su forma.

Las formas angulares y equidimensionales, así como rugosas superficialmente deben preferirse a las formas redondeadas, alargadas y planas o lajeadas. Las primeras por ser proclives a deslizarse y las últimas por su tendencia a sufrir fracturas. Las especificaciones actualmente señalan lineamientos para determinar la forma de la partícula y su textura superficial, estableciendo los contenidos máximos admisibles de partículas alargadas y aplanadas, así como el número de caras fracturadas que presenten las partículas. Por regla general, en las capas de base y carpeta, los agregados deben obtenerse mediante trituración total, cuidando durante el proceso de trituración no obtener partículas de forma inapropiada.

2.6.5 Contenido de asfalto

El contenido de asfalto es el parámetro que más influye en el comportamiento de las mezclas asfálticas. (Garnica A. P., et al, 2005)

Para un tipo de mezcla asfáltica determinado, se tiene que:

- Para valores de porcentajes de asfalto por debajo del óptimo, la resistencia mecánica y la resistencia a la fatiga aumentan con el incremento del contenido de asfalto.
- Para valores de porcentajes de asfalto por encima del óptimo, se presenta una disminución de las características mecánicas de la mezcla, incluso con aumento del riesgo a sufrir deformación permanente.



Es por ello que, así como el material pétreo debe de cumplir con ciertas normas, también el material asfáltico debe de cumplir con valor especificados en las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (N-CMT-4-04-01, SCT)



CAPITULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

El desarrollo de este trabajo consistió básicamente en la realización de dos etapas de trabajo: una de muestreo en campo y otra de análisis en laboratorio. En la primera se llevó a cabo la toma de muestras de mezclas asfálticas directamente de la producción en las plantas fabricantes y la extracción de núcleos de carpetas construidas con las mezclas en estudio, y la segunda etapa consistió en la ejecución de ensayos de laboratorio, encaminados a caracterizar tanto los especímenes elaborados con las mezclas tomadas de las plantas, como de los núcleos extraídos de los tramos de carpeta asfáltica construida con las mismas mezclas.

Se obtuvieron siete muestras tanto de mezclas asfálticas como de núcleos de carpeta construida. A la mezcla asfáltica se le realizaron dos muestras, que fueron contenido de asfalto y granulometría; la primera con el fin de conocer el porcentaje de asfalto contenido en ésta y así valorarla de acuerdo a la normativa, al igual la segunda prueba se realizó con el fin de evaluar la granulometría de la mezcla y saber si los valores obtenidos están dentro de los valores normados. El procedimiento de éstas pruebas se explican mas adelante en este capitulo.

A los núcleos de carpeta se le realizaron cinco pruebas diferentes, que fueron porcentaje de vacíos, peso volumétrico, tensión indirecta, estabilidad y flujo. El objetivo de cada una de estas pruebas fue para evaluar cada núcleo y así comparar los valores obtenidos con los valores normados, para así conocer la calidad tanto de las mezclas como de las carpetas ya construidas y puestas en servicio. El procedimiento de cada una de estas pruebas se explica mas a delante en este mismo capitulo.

3.2 Trabajos de campo

Los trabajos de campo, como ya se mencionó antes, consistieron en la toma de muestras de mezcla asfáltica directamente de las bandas transportadoras en las plantas fabricantes de concretos asfálticos, las cuales fueron transportadas debidamente al laboratorio de dichas plantas para la elaboración de especímenes Marshall de prueba. Asimismo, fue necesario extraer, con el uso de brocas diamantadas, núcleos de las carpetas construidas, delimitando exactamente el tramo de carretera donde fueron colocadas las mezclas muestreadas en la planta al momento de su fabricación, lo cual resultó determinante para poder establecer las correlaciones entre las propiedades físicas y mecánicas de interés entre la mezcla elaborada y el producto final que es la carpeta asfáltica construida. La figura 3.1 muestra el proceso de extracción de núcleos de carpeta asfáltica, en uno de los tramos de carretera estudiados (Alonso-Mota y Leal-Rocha, 2010).



Figura 3. 1 Extracción de núcleos de carpeta asfáltica

3.2.1 Muestreo de la mezclas asfálticas

El muestreo consistió en obtener una parte representativa de la mezcla ocupada para la conformación de las carpetas en cada una de las plantas y



núcleos en obras visitadas, éstas se envasaron, identificaron, transportaron y almacenaron debidamente.

3.2.1.1 Envase e identificación

El envase de la mezcla asfáltica se realizó en charolas metálicas rectangulares debidamente lubricadas para evitar la adherencia de la mezcla en esta y con esto la pérdida de material fino. En cuanto al envase de los especímenes Marshall, se tuvo el cuidado de dejarlos en los moldes hasta que su temperatura fuera óptima para evitar deformaciones o pérdida de material en éstos.

La identificación se hizo mediante etiquetas adheribles en las cuales se anotó con letra de molde, legible y con tinta, peso, dimensiones y número de espécimen, (figura 3.2). Posteriormente en la libreta de campo se anotó la siguiente información:

- Fecha
- Planta de muestreo
- Densidad de asfalto y material pétreo
- Tipo de mezcla, asfalto y granulometría
- Lugar de colocación
- Contenido de asfalto
- Notas adicionales

3.2.1.2 Transporte y almacenamiento

Para transportar las muestras obtenidas de mezclas y especímenes, éstas se colocaron en una charola metálica rectangular, la cual fue debidamente cubierta para evitar la contaminación de las muestras, ésta se acomodó en el vehículo utilizado, de tal manera que se evitaran golpes o volcaduras.

Ya en el laboratorio los especímenes se almacenaron apiladas en gavetas cerradas evitando la humedad o alguna caída, mientras la mezcla solo se almacenó por poco tiempo sobre las mismas gavetas, procurando se mantuvieran protegidas para evitar pérdida de material o contaminación del mismo.



Figura 3. 2 Identificación de especímenes Marshall.

3.2.2 Muestreo de núcleos de carpeta

El muestreo de los núcleos de carpeta consistió primero en identificar el lugar exacto en que quedó colocada la mezcla muestreada, después de algunos días en dicho sitio y con la ayuda de una broca diamantada se extrajeron de 6 a 4 núcleos, buscando que las extracciones fueran en los extremos y el centro del tramo de muestra. Inmediatamente después de la extracción del núcleo se colocó mezcla asfáltica y se compactó para evitar daños a todo el tramo.



3.2.2.1 Identificación, transporte y almacenamiento

La identificación de los núcleos se realizó con etiquetas adheribles o leyendas sobre las muestras con crayola, utilizando la misma información de los especímenes Marshall hechos en el laboratorio de la planta para la misma mezcla.

Para transportarlos del lugar donde se obtuvieron al laboratorio, estas muestras se colocaron en charola metálicas redondas, acomodándolas en el vehículo utilizado de tal forma que no sufrieran golpes o volcaduras, ésto para evitar la deformación o desgrane de las muestras.

3.3 Trabajos de laboratorio

Las muestras de mezcla asfáltica fueron transportadas al laboratorio principalmente para la determinación de sus características físicas y mecánicas, como peso volumétrico, porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo y resistencia a la tensión indirecta, aunque también para utilizarse en la fabricación de los especímenes de prueba, de acuerdo con el procedimiento Marshall. El proceso de compactación de los éstos, consistió en la aplicación de 75 golpes por cara, en virtud de que las mezclas se utilizaron en la construcción de vialidades con tránsito esperado superior al millón de ejes equivalentes. Otros especímenes de características similares fueron elaborados para determinar la resistencia a la tensión indirecta y la deformabilidad de las mezclas.

Los núcleos de carpeta asfáltica extraídos de los diferentes tramos de carretera estudiados, fueron ensayados en el laboratorio, determinando sus propiedades físicas tales como el peso volumétrico alcanzado mediante la compactación aplicada durante el proceso constructivo y la relación de vacíos final una vez que la capa quedó terminada. Estos núcleos, también denominados corazones de carpeta, fueron sometidos a ensayos de tensión indirecta, estabilidad y flujo. (Alonso-Mota y Leal-Rocha, 2010)



El ensayo de tensión indirecta consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo de los ejes diametrales del espécimen cilíndrico. La magnitud de la carga es de al menos 100 kN, y ésta debe ser aplicada a una velocidad de deformación constante de 50 mm por minuto hasta la falla. La carga se aplica por medio de dos barras, debido a la forma cilíndrica de la probeta; la carga de compresión se transforma en un esfuerzo de tensión. Durante el ensayo, la carga y la deformación son registradas hasta que ocurre la falla del espécimen. El ensayo puede realizarse a temperaturas de -10 °C, 4 °C y 20 °C para un análisis completo. (Garnica A. P., et al, 1998)

3.3.1 Ensayes de laboratorio para mezclas asfálticas.

Los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo con las mezclas asfálticas son principalmente para conocer las características físicas de ésta, como lo es contenido de asfalto y granulometría.

3.3.1.1 Contenido de asfalto

Para realizar esta prueba es necesario hacer la visita correspondiente a una planta elaboradora de mezcla asfáltica, ya que se debe muestrear dicha mezcla directamente de la banda despachadora del producto. (Figura 3.3). La muestra obtenida en el paso anterior, se somete a un proceso de cuarteo, (Figura 3.4) con el fin de obtener una muestra representativa con peso de 500 a 600 gramos.



Figura 3. 3 Obtención de la muestra de mezcla asfáltica.



Figura 3. 4 Cuarteo de la muestra de mezcla asfáltica.

Teniendo la muestra representativa descrita anteriormente, se pesa, registrando éste como W_m . Se vierte dicha muestra en el equipo de extracción de asfalto (Rotarex) como de ve en la figura 3.5, teniendo cuidado especial para evitar pérdida de material, evitando así una alteración en los resultados.



Figura 3. 5 Colocación de material en equipo Rotarex



Figura 3. 6 Extracción de material lavado.

Se cierra el equipo Rotarex y se inicia un proceso de lavado vertiendo solvente (gasolina o tricloro-etileno) en la parte superior del equipo, ésto para lograr desprender el cemento asfáltico de los agregados pétreos. La operación anterior se repite las veces que sea necesario de forma tal que la gasolina que es expulsada del equipo al momento de hacer los lavados, salga prácticamente limpia. Se extrae la muestra del equipo Rotarex y se coloca en una charola redonda (con peso conocido). Figura 3.6

Se deja evaporar la gasolina del material pétreo, y a continuación se somete el material a un proceso de secado total, mediante la colocación en un



horno eléctrico, a 100 a 105° C, o por medio de secado rápido en estufa. Una vez seca la muestra se registra su peso, denominando a este como W_{la} .

Para la determinación del contenido de asfalto en mezclas asfálticas se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%CA = \frac{W_m - W_{la}}{W_{la}} \times 100$$

Donde:

C.A. = Contenido de cemento asfáltico presente en la mezcla, expresado en porcentaje respecto al material pétreo seco.

W_m = Es el peso inicial de la mezcla asfáltica, expresada en gramos

W_{la} = Es el peso del material pétreo el cual conforma la mezcla asfáltica, expresado en gramos después de haber sido sometido a los procesos de lavado y secado correspondiente.

3.3.1.2 Granulometría

El objetivo es determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en la elaboración de la mezcla asfáltica, mediante su paso por una serie de mallas (figura 3.7) con aberturas determinadas.



Figura 3. 7 Extracción de material lavado

Se seca la muestra en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta masa constante, registrándola como W_{MO} , en g. Se coloca en un vaso metálico, se agrega agua y se deja reposar por un tiempo mínimo de 12 horas. Se lava el material, agitándolo en forma de “ochos” utilizando la varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla No. 200 (0.075 mm). Para facilitar el paso y eliminación de los finos se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia. Se regresa el material retenido en la malla No. 200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta masa constante. Se ensamblan las mallas en orden descendente de aberturas, terminando en el fondo con la charola receptora. Se deposita sobre la malla superior (la de mayor abertura) la muestra de material pétreo y se coloca la tapa. Se toma con ambas manos el conjunto de mallas, desde la charola hasta el fondo y se procede a balancearlo de un lado a otro sobre una superficie rígida, haciendo este movimiento uniforme de tal modo que la agitación sea continua.

Se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido en la malla



correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés. Se grafican los resultados en un sistema de ejes semilogarítmico, poniendo en el eje horizontal el tamaño de las partículas (abertura de las mallas) y en el vertical el porcentaje que pasa por cada una de las mallas utilizadas en el ensaye. Se traza una curva suave que una los puntos correspondientes al tamaño de las partículas y el porcentaje que pasa.

Se calculan y reportan los porcentajes respecto a la masa de la muestra original, correspondientes a cada una de las mallas, utilizando las siguientes fórmulas:

$$\%M_N = \frac{W_N}{W_{MO}} \times 100$$

Donde:

$\%M_N$ = Porcentaje de material retenido en la malla N, respecto a la masa original.

W_N = Masa del material seco retenido en la malla N, en gramos.

W_{MO} = Masa de la muestra original seca, en gramos.

3.3.2 Ensayes de laboratorio para especímenes elaborados mediante el método Marshall y para núcleos de carpeta

Los ensayes realizados a los especímenes Marshall y a los núcleos de carpeta son principalmente para conocer las características mecánicas de la carpeta, a continuación se describe cada una de ellas:

3.3.2.1 Peso volumétrico

Hablar del peso volumétrico en un material es hablar también de su grado de compactación. Según Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1986), la compactación es un proceso mecánico para reducir el volumen de los materiales con el fin de que sean resistentes a las cargas. La reducción de volumen del suelo se lleva a cabo utilizando maquinaria especializada.



El objetivo de éste análisis es determinar el grado de acomodo alcanzado por la mezcla asfáltica durante el proceso de construcción de la carpeta, medido como la relación entre el peso específico logrado en la mezcla compactada y el peso específico promedio de los especímenes Marshall, fabricados en el laboratorio, registrado como γ_{lab} (peso específico de la muestra). Básicamente consiste en la extracción de núcleos de carpeta asfáltica por medio de una máquina extractora que cuenta con una broca de diamante, la cual corta la muestra y al mismo tiempo la extrae.

Al obtener las muestras, éstas se pesan con aproximación de 1 gr, y este peso se registra como W_m , simultáneamente se pone parafina a calentar hasta quedar líquida, posteriormente las muestras se cubren con estearato de zinc y se sumergen en la parafina líquida, una vez que la parafina se ha solidificado las muestras se pesan registrando éste peso como W_{m+p} . Posteriormente las muestras se sumergen en agua para obtener el peso sumergido que se registra como W' y cada uno de estos datos se registra en un formato (tabla 3.1) diseñado para facilitar su cálculo.

Tabla 3. 1 Formato de registro de datos para el cálculo del peso volumétrico y grado de compactación

N° de muestra	W_m	W_{m+p}	W'	W_p	V_{m+p}	V_p	V_m	Pespc	GC (%)
	1	2	3	4 (2-1)	5 (2-3)	6 (4/ γ_p)	7 (5-6)	8 (1/7)	9 (8/ γ_{lab})*100



Dónde:

W_m = Peso de la muestra

W_{m+p} = Peso de la muestra más parafina

W' = Peso de la muestra sumergida

W_p = Peso de la parafina

V_{m+p} = Volumen de la muestra más parafina

V_p = Volumen de la parafina

V_m = Volumen de la muestra

GC = Grado de compactación

3.3.2.2 Porcentaje de vacíos

El objetivo es determinar el porcentaje de huecos en la mezcla asfáltica, posterior al proceso de elaboración de los especímenes, mediante el método Marshall. Se miden los especímenes, con aproximación de 0.1 mm, utilizando un vernier. Se pesan los especímenes Marshall en la balanza con aproximación de 1 gramo. Se cubren con una capa delgada de estearato de zinc y posteriormente con parafina fundida. Una vez que la parafina ha solidificado, se pesan nuevamente. Enseguida se determina el peso de los especímenes sumergidos en el tanque de agua. Se extraen del tanque de agua y se secan para retirar la capa de parafina.

Para realizar el cálculo del porcentaje de vacíos se utilizó el siguiente formato, tabla 3.2 para facilitar el registro y cálculo de los datos:

Tabla 3. 2 Formato de apoyo para el registro y cálculo de datos para porcentaje de vacíos

ENSAYE	PROBETA No.	% DE CEMENTO ASFÁLTICO EN PESO RESPECTO:		P E S O (g)			MATERIAL DE CUBRIMIENTO
		AL AGREGADO	A LA MEZCLA	E S P É C I M E N			
				RECUBIERTO EN AIRE	SIN RECUBRIR EN AIRE	RECUBIERTO SUMERGIDO EN AGUA	
		a	b	c	d	e	f
							c-d



VOLUMEN (cm ³)			PESO ESPECIFICO (g/cm ³)	
ESPÉCIMEN RECUBIERTO	MATERIAL DE CUBRIMIENTO	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN	TEÓRICO MÁXIMO
g	h	i	j	k
c-e	f/γ _p	g-h	d/i	(*)

Para calcular el porcentaje de vacíos es necesario conocer los siguientes datos:

PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO: γ _{C.A.} = _____ g/cm ³
PESO ESPECÍFICO DEL MATERIAL PÉTREO: γ _{M.P.} _____ g/cm ³
PESO ESPECÍFICO DE LA PARAFINA: γ _P = _____ g/cm ³

De acuerdo a las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los valores que se deben cumplir son los siguientes, tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Requisitos de porcentaje de vacíos para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	ΣL ≤ 10 ⁶	10 ⁶ < ΣL ≤ 10 ⁷ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Vacíos en la mezcla asfáltica (VCM); %	3 - 5	3 - 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8.2 t se requiere un diseño de la mezcla.

3.3.2.3 Estabilidad y flujo

Los valores de estabilidad y flujo en especímenes de concreto asfáltico, elaborados mediante el método Marshall, son características mecánicas de la carpeta que reflejan su calidad. Estas características deben cumplir con valores especificados en las Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (N-CMT-4-05-003/02) y las especificaciones particulares del proyecto.

Para determinar estos valores se requiere tener elaborados los especímenes, por el método de Marshall, de acuerdo al diseño elegido, ya sean 50 ó 75 golpes por cara (Figura 3.8). Las muestras se sumergen en baño maría, con agua a temperatura de 60°C, manteniéndola constante durante un lapso de 20 a 30 minutos (Figura 3.9). Una vez transcurrido el tiempo necesario para que la temperatura de las muestras sea uniforme, se sacan de una por una del baño maría en el orden en que fueron colocadas. Se colocan inmediatamente los especímenes en la prensa Marshall y se aplica la carga para obtener los valores de estabilidad. Simultáneamente se mide la deformación impuesta, registrando la correspondiente a la carga máxima soportada. (Figuras 3.10)



Figura 3. 8 Especímenes de concreto asfáltico, elaborados mediante el método de Marshall



Figura 3. 9 Colocación de las muestras en baño maría



Figura 3. 10 Ensaye de los especímenes de mezcla asfáltica en la prensa de Marshall, para la determinación de estabilidad y flujo.



Los valores de flujo se obtienen directamente durante la etapa de carga en la prensa de Marshall. Para determinar la estabilidad es necesario multiplicar los valores obtenidos por la constante de deformación del anillo de carga. A continuación se muestra un formato de apoyo (tabla 3.4), diseñado para desarrollar los cálculos de la estabilidad y el flujo de especímenes Marshall, a partir de los datos recabados durante el ensaye.

Tabla 3. 4 Formato de apoyo para el registro de datos de la estabilidad y flujo.

ESTABILIDAD					FLUJO EN:	
LECTURA DEL MICRÓMETRO (mm) o (pulg)	ALTURA DEL ESPÉCIMEN (cm)	ESTABILIDAD (kg)	FACTOR DE CORRECCIÓN POR ALTURA	ESTABILIDAD CORREGIDA (kg)	mm	pulg.
s	t	u	v	w	y	z
		s*r (**)		u*v		

(**) r= Constante del anillo de carga

En la Tabla 3.5, que se muestra a continuación, se indican los valores de estabilidad y flujo, contenidos en la Norma N-CMT-4-05-003-/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su última edición 2006.

Tabla 3. 5 Requisitos de Estabilidad y Flujo para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Características	Número de ejes equivalentes de diseño $\sum L^{[1]}$	
	$\sum L \leq 10^6$	$10^6 < \sum L \leq 10^7$ [2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5340 (1200)	8000 (1800)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2 – 4 (8-16)	2 -3,5 (8-14)

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

[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8,2t, se requiere un diseño especial de la mezcla



3.3.2.4 Tensión indirecta

Otra de las características mecánicas que reflejan la calidad de las carpetas asfálticas, es la resistencia a la tensión indirecta. La Norma NLT-346/90 describe el procedimiento para obtener estos valores tanto en especímenes Marshall como en núcleos de carpetas.

El principio del método consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los planos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre las generatrices opuestas, el parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta.

El procedimiento que se debe seguir para llevar a cabo esta prueba es el siguiente: se deben obtener las dimensiones de los especímenes y núcleos de carpetas para determinar su volumen aproximado, ya que este es necesario para los cálculos. Las muestras deben de permanecer en un sitio a temperatura constante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Posteriormente a esto, las probetas se colocan en una prensa de compresión mecánica o hidráulica que aplique la carga a una velocidad constante de 0.85 ± 0.02 mm/s (50.8 mm/min), y una carga de 10 kN (10^4 , kgf) como mínimo. Al terminar de colocar cada uno de los especímenes se colocan los micrómetros en ceros para iniciar con la lectura de carga y deformación, al llegar a la falla se registra la lectura en ambos micrómetros y se repite el procedimiento hasta haber probado todos los especímenes.

El equipo necesario para llevar a cabo la prueba es el siguiente: una prensa para ensayar las probetas, se puede utilizar cualquier tipo de prensa de compresión mecánica o hidráulica que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de 0.85 ± 0.02 mm/s (50.8 mm/min), y una carga de 100 kN (10^4 kgf) como mínimo. Un recinto de capacidad suficiente para guardar las probetas para el ensayo y mantenerlas a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Dispositivo de medición con precisión de ± 0.1 mm para medir el diámetro y altura de las probetas y un dispositivo que



permita la sujeción mediante contacto de la probeta por sus caras planas. El contacto será de las dos generatrices con los elementos transmisores de la carga, estos elementos son dos barras de apoyo, las cuales pueden ser madera contrachapada o cartón sin defectos de 3mm de espesor, 25mm de ancho y de longitud igual o ligeramente superior a la generatriz de la probeta. Por ultimo un sistema de medición para desplazamientos verticales y horizontales con precisión de $\pm 0.01\text{mm}$.

Se miden el diámetro y la altura de las probetas, aunque estas características no son indispensables es preferente utilizar probetas que tengan un diámetro de 10.16 cm y una altura de unos 6.3 cm y como mínimo estas probetas deben tener una altura de 3.5cm, el procedimiento de compactación de la probeta se lleva a cabo de acuerdo al ensaye Marshall. Al obtener las dimensiones de las probetas y mantenerlas por seis horas a una temperatura constante se procede a colocar las muestras en la prensa para comenzar a aplicarles la carga hasta llevarlas a la falla. (Norma NLT-346/90).

Los resultados que se registran son la carga y el desplazamiento horizontal de la muestra y sus dimensiones (Tabla 3.6). Y para calcular el resultado de tensión indirecta se utiliza la siguiente formula:

$$R\tau = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d}$$

donde :

$R\tau$ = resistencia a la compresión diametral, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ (kgf/cm^2)

P = carga máxima de rotura, N (kgf)

π = constante 3.14159...

h = Altura de la probeta, mm (± 0.1 mm)

d = Diámetro de la probeta, mm (± 0.1 mm)

Tabla 3. 6 Formato de apoyo para el registro de datos de tensión indirecta.

No. Probeta	Altura	Diámetro	Volumen	Desplazamiento	Carga



CAPITULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Características de las mezclas asfálticas estudiadas

A continuación se detallan los resultados obtenidos de los distintos ensayos de laboratorio practicados tanto a las mezclas como a los especímenes elaborados con éstas. Los ensayos efectuados a las mezclas nos permiten conocer su composición, es decir, las proporciones de materiales pétreos y cemento asfáltico utilizados en su elaboración; mientras que las pruebas a las que son sometidos los especímenes fabricados, arrojan información relativa a sus propiedades físicas y mecánicas, la cuales guardan una relación directa con el comportamiento esperado y la durabilidad de las carpetas con ellas construidas.

4.1.1 Características granulométricas

Las características granulométricas permiten conocer la composición por tamaños de las partículas de material pétreo. El ensaye de laboratorio consiste en separar el material por tamaños, mediante el uso de tamices con aberturas determinadas.

Es costumbre representar la granulometría de un material pétreo para mezcla asfáltica mediante un gráfico trazado en un sistema de ejes semilogarítmico, poniendo en el eje horizontal el tamaño de las partículas (o abertura de la malla) y el en vertical el porcentaje de partículas con tamaño igual o menor que ese tamaño. Asimismo, en el plano se trazan curvas que delimitan los porcentajes mínimos y máximos permitidos para cada uno de los tamaños de partículas.

Los resultados de los ensayos granulométricos practicados a los materiales pétreos de las diferentes mezclas, se muestran en la figura 4.1 y en la tabla 4.1.

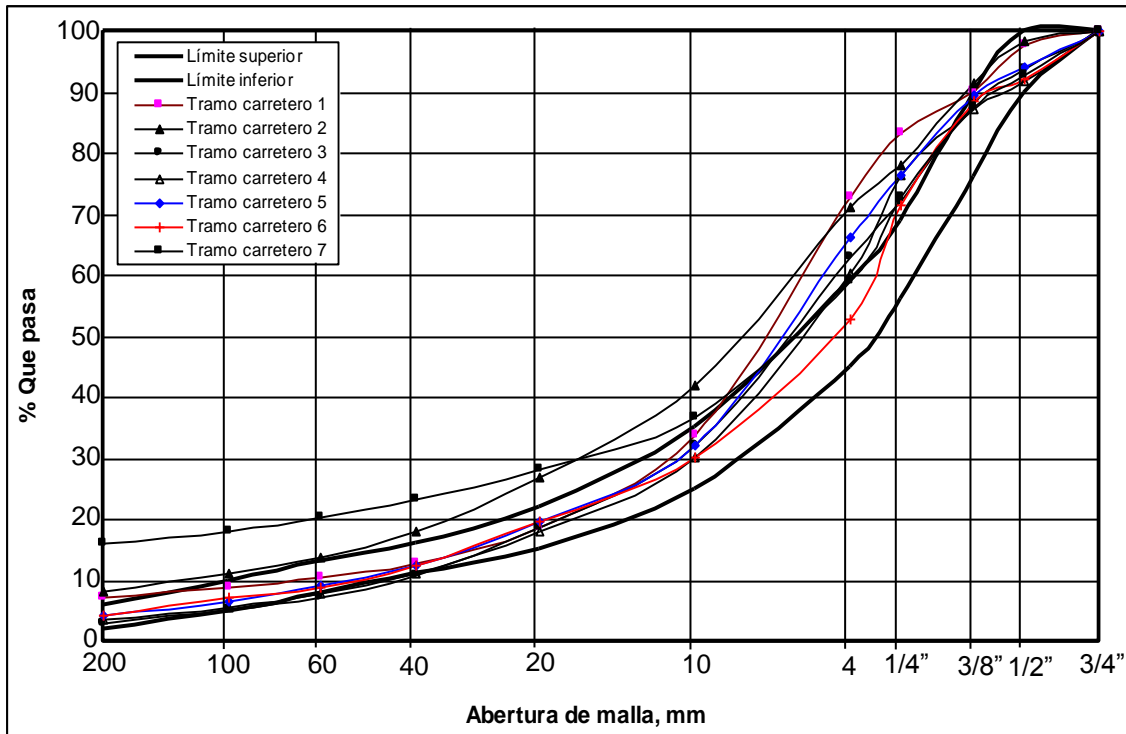


Figura 4. 1 Curvas granulométricas de los materiales pétreos analizados, para tamaño nominal de 12.5 mm.

Los materiales estudiados presentan, en general, deficiencias en su composición granulométrica, especialmente los de los tramos 2 y 7, consistentes principalmente en un elevado contenido de partículas finas y arena, como puede apreciarse en la figura 4.1. Esto puede dar lugar a que las mezclas que con ellos se elaboren presenten mayor deformabilidad y menor resistencia.



Tabla 4. 1 Granulometría de los materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa, con tamaño nominal de 12.5 mm (para cualquier valor de ΣL).

MALLA		N-CMT-4-04/08		Porcentaje que pasa						
Designación	Abertura mm	Límite Inferior	Límite Superior	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7
3/4"	19.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2"	12.5	90	100	98	98	94	92	94	92	93
3/8"	9.5	76	90	90	91	88	87	89	89	88
1/4"	6.3	56	69	83	78	72	76	76	71	73
No. 4	4.75	45	59	73	71	63	60	66	53	59
No. 10	2.000	25	35	34	42	32	30	32	30	37
No. 20	0.850	15	22	19	27	19	18	20	20	28
No. 40	0.425	11	16	13	18	11	11	13	12	23
No. 60	0.250	8	13	11	14	7	8	9	9	20
No. 100	0.150	5	10	9	11	5	6	7	7	18
No. 200	0.075	2	6	7	8	3	4	4	4	16

4.1.2 Contenido de asfalto

Mediante el proceso de extracción del cemento asfáltico contenido en la mezcla, utilizando solventes, se obtiene una muestra del material pétreo utilizado, lo que permite verificar la composición granulométrica real obtenida además de poder determinar el porcentaje de cemento asfáltico contenido en la mezcla, el cual se compara con el óptimo de diseño, para evaluar la eficiencia de los procesos de dosificación y mezclado en la planta.

Tabla 4. 2 Contenido de asfalto en la mezcla.

Tramo carretero número	Contenido de asfalto %	Contenido óptimo %
1	5.98	5.8
2	5.61	5.6
3	6.96	5.6
4	5.06	5.6
5	5.02	5.6
6	5.01	5.6
7	5.42	5.6

El contenido de asfalto en la mezcla utilizada en el tramo número 3 es excesivo. Este elevado contenido de asfalto se ve reflejado en una disminución del valor de estabilidad, siendo éste el más bajo de todas las mezclas estudiadas.



Para mezclas asfálticas densas, es poco usual emplear porcentajes de asfalto superiores a 6.5.

4.2 Características de los especímenes elaborados mediante el método Marshall.

4.2.1 Peso volumétrico

Una de las características con mayor aplicación en el control de calidad de las mezclas asfálticas es el peso volumétrico que la mezcla alcanza al ser sometida a un proceso de compactación en el laboratorio, durante la elaboración de los especímenes conforme el procedimiento Marshall, ampliamente utilizado en estos trabajos. Dicho valor de compactación tiene aplicación al evaluar el grado de compactación de la carpeta construida con esta mezcla. Los valores de peso volumétrico alcanzados por las distintas mezclas estudiadas están contenidos en la tabla 4.3, que se muestra a continuación.

Tabla 4. 3 Peso volumétrico de especímenes Marshall.

Tramo carretero número	Peso específico máximo Marshall kg/m^3
1	2351
2	2372
3	2232
4	2245
5	2179
6	2278
7	2219

4.2.2 Estabilidad y flujo

Los valores de estabilidad y flujo son indicadores de la resistencia de la mezcla a las deformaciones plásticas. El valor de flujo corresponde a la deformación determinada en un espécimen cuando alcanza su máxima resistencia.



La tabla 4.4 contiene los valores promedio de estabilidad y flujo, resultantes de los ensayos practicados a las distintas muestras trabajadas.

Tabla 4. 4 Estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas estudiadas.

Tramo carretero número	Estabilidad N	Flujo mm	N-CMT-4-05-003/08	
			Estabilidad	Flujo
1	13646	4.0	8000 Mínimo	2 a 3.5
2	15539	4.1	8000 Mínimo	2 a 3.5
3	8682	3.3	8000 Mínimo	2 a 3.5
4	10428	3.6	8000 Mínimo	2 a 3.5
5	11056	3.7	8000 Mínimo	2 a 3.5
6	14843	3.5	8000 Mínimo	2 a 3.5
7	11056	3.9	8000 Mínimo	2 a 3.5

Como puede apreciarse la estabilidad de las mezclas es, en general, mayor que la mínima especificada. Los valores de flujo están, en promedio, por encima de los límites establecidos en las normas oficiales.

4.3 Características de los núcleos de carpeta asfáltica estudiados

Usualmente, el control de calidad de la carpeta terminada se evalúa exclusivamente con una cuantificación del grado de densificación alcanzado durante el proceso de compactación a que se ve sometida la mezcla asfáltica, obteniendo la relación entre el peso volumétrico alcanzado en la carpeta construida y el peso volumétrico obtenido en los especímenes elaborados en el laboratorio con la mezclas acabadas de fabricar.

4.3.1 Peso volumétrico y grado de compactación de la carpeta asfáltica

Los pesos volumétricos obtenidos en el ensaye de los núcleos de las carpetas asfálticas se indican en la tabla 4.5.



Tabla 4. 5 Peso volumétrico de los núcleos y grado de compactación de la carpeta asfáltica.

Tramo carretero número	Peso volumétrico de los núcleos de carpeta kg/m^3	Peso volumétrico de los especímenes Marshall kg/m^3	Grado de compactación %
1	2125	2351	90
2	2370	2372	100
3	2227	2232	100
4	2137	2245	95
5	2122	2179	97
6	2263	2278	99
7	2201	2219	99

Los valores de peso volumétrico obtenidos varían en un amplio rango. La aplicación principal de esta característica es en la determinación del grado de compactación de la carpeta asfáltica. Como puede verse, los grados de compactación logrados son en general, mayores que el mínimo de diseño, establecido usualmente entre 95 y 100 %.

4.3.2 Resistencia a la tensión indirecta

Adicionalmente, los núcleos de carpeta fueron sometidos a ensayos de tensión indirecta. Los valores obtenidos para los diferentes tramos carreteros se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Resistencia a la tensión indirecta de los núcleos de carpeta asfáltica.

Tramo carretero número	Resistencia a la tensión indirecta kg/cm^2
1	2.83
2	3.48
3	3.81
4	5.24
5	6.07
6	6.20
7	8.48

Los valores de resistencia a la tensión indirecta son muy variados, no obstante que se trata de mezclas que deben tener una calidad similar, ésto puede



atribuirse a las condiciones de manejo y procesamiento de la mezcla, principalmente al proceso de compactación, ya que estos valores reflejan las condiciones finales de la mezcla, es decir la manera en que se ha logrado conformar la carpeta.

4.4 Relación peso específico y resistencia a la tensión indirecta

Uno de los principales objetivos del proyecto ha sido aplicar un método de ensaye de las mezclas y un procedimiento de análisis de los resultados que permitan mejorar el control de calidad de las carpetas construidas, mediante la evaluación de alguna características que refleje la resistencia a los esfuerzos de tensión a que se ven sometidas las carpetas de los pavimentos una vez que el tránsito incide sobre ellas. El parámetro que se ha evaluado es la resistencia a la tensión indirecta, considerado un buen indicador de la cohesión alcanzada por la mezcla durante el proceso de compactación. Como parte del análisis de resultados, se han definido las relaciones entre ese parámetro y otras características de la mezcla como el grado de densificación, expresado como el peso volumétrico que la mezcla alcanza después de ser compactada durante el proceso constructivo. En la figura 4.2 se presenta la correlación que guarda el peso volumétrico de la carpeta asfáltica y su resistencia a la tensión indirecta.

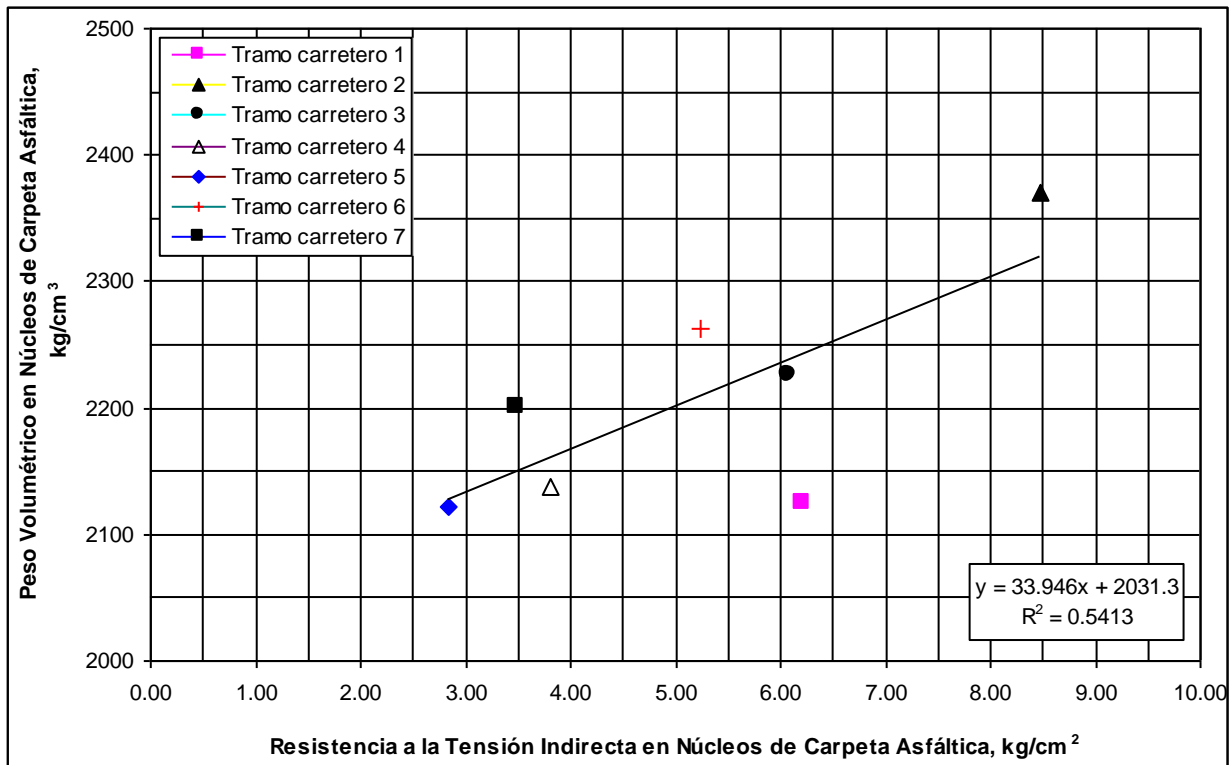


Figura 4. 2 Relación entre el peso volumétrico y la resistencia a la tensión indirecta

Con base en la relación que guardan los pesos volumétricos y la resistencia a la tensión indirecta, que se muestra en la figura 4.2 puede verse que con mezclas de buena calidad, adecuadamente procesadas, como en el caso del tramo 2, pueden obtenerse valores de resistencia elevados, para pesos volumétricos también altos; sin embargo, puede verse también que mezclas con pesos volumétricos similares, como los correspondientes a los tramos 1, 3 y 6, tienen resistencia muy variable, de lo que se deduce que el peso volumétrico no debe tomarse como un indicador confiable de la calidad de la carpeta asfáltica construida.

Otro de los factores que influyen tanto en el peso volumétrico como en el valor de la resistencia a la tensión indirecta es la heterogeneidad que presenta este tipo de mezclas. A esto se le puede sumar el mal manejo que se le da por parte de quienes transportan las mezclas desde la planta donde se producen hasta el lugar en el cual será construida la carpeta.



La temperatura a la cual debe de ser compactada la mezcla muchas veces no es la adecuada, y como se puede ver en la figura 4.2 podemos tener valores aceptables tanto en el valor del peso volumétrico como en el de la tensión indirecta y valores demasiado bajos, siendo estas mezclas producidas por el mismo proveedor.

Sin embargo, se puede concluir que aunque existe una dispersión en los datos obtenidos, se puede llegar a tener una relación entre éstos y los valores de R^2 son aceptables, ya que un valor relativamente alto es de 0.7 y éste es difícil de alcanzar.

4.5 Relación entre estabilidad y resistencia a la tensión Indirecta en especímenes Marshall

En la figura 4.3 se muestra la correlación que guardan los valores de estabilidad de los especímenes Marshall (probetas elaboradas en el laboratorio) y la resistencia a la tensión indirecta alcanzada por las mismas mezclas después del proceso de acarreo, tendido y compactación, a que fueron sometidas para conformar las carpetas asfálticas en estudio.

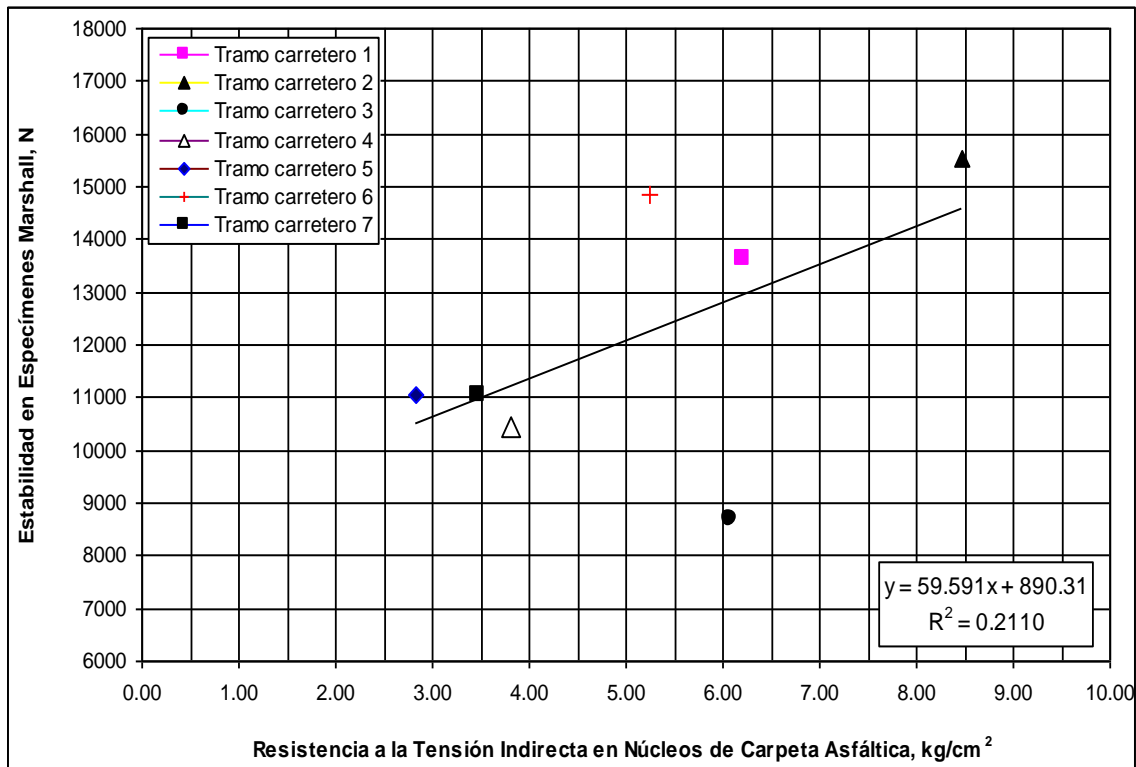


Figura 4. 3 Relación entre la estabilidad en especímenes Marshall y la resistencia a la tensión indirecta, en núcleos de carpeta asfáltica.

Puede verse como los valores de estabilidad Marshall, no reflejan adecuadamente la capacidad de la carpeta para resistir los esfuerzos de tensión, que son los más importantes a que se ve sometida la carpeta por el paso de los vehículos. Puede deducirse que la estabilidad no refleja el grado de cohesión que la mezcla tiene, el cual si puede ser evaluado con los ensayos de tensión.

Para valores muy similares de estabilidad, en rangos adecuados, conforme a la normativa, las resistencias a la tensión que, como se ha señalado son un buen reflejo de la cohesión de la mezcla, varía en un rango sumamente amplio. Esto se debe una vez más al mal manejo que recibe la mezcla y a su ya antes mencionada heterogeneidad.

Otra de las causas por las cuales se pueden presentar valores muy dispersos en los resultados, es porque en las plantas donde se producen esta

mezclas llega a existir sobre producción y el personal se ve obligado a almacenar parte de su producción en lugares al aire libre, en donde la mezcla se contamina con otros materiales y pierde temperatura, esto por consecuencia afecta a la cohesión, que es necesaria para soportar dichos esfuerzos de tensión.

4.6 Relación entre tensión indirecta de especímenes Marshall y núcleos de carpeta asfáltica

La figura 4.4 que se presenta a continuación, muestra la relación que guardan los valores de resistencia a la tensión, medidos en los especímenes Marshall y en los núcleos de la carpeta asfáltica terminada, para los distintos tramos carreteros estudiados.

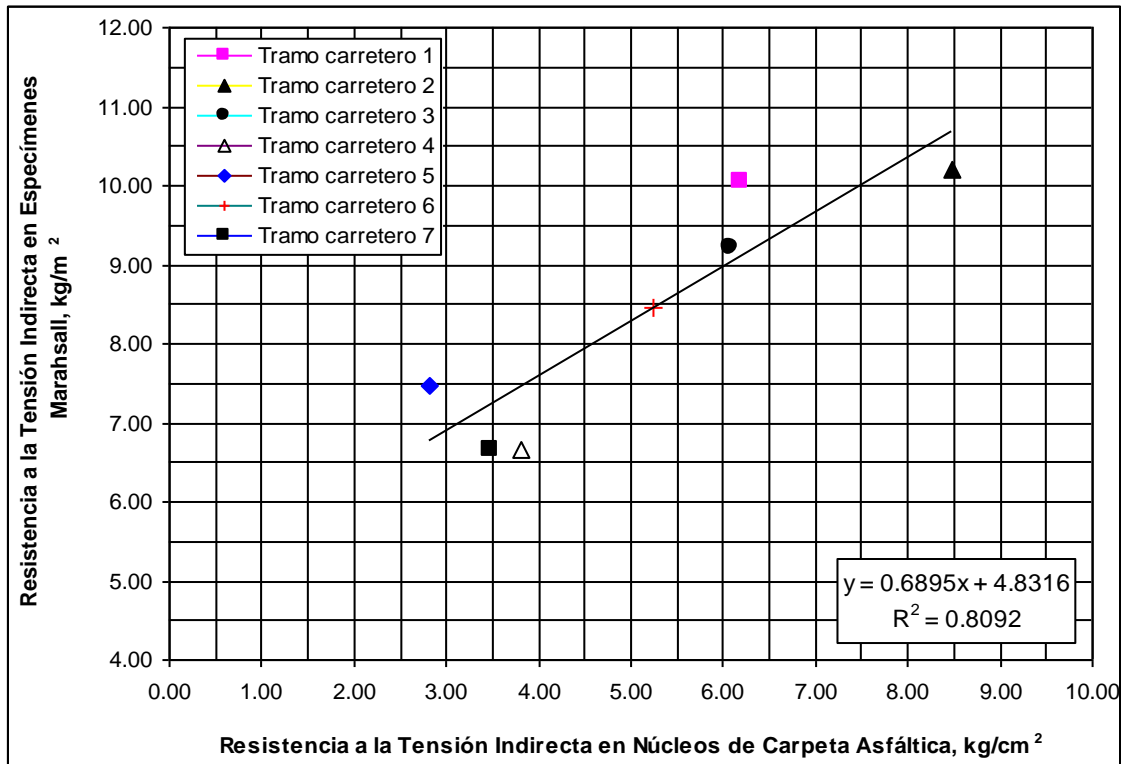


Figura 4.4 Relación entre la resistencia a la tensión indirecta en especímenes Marshall y la resistencia a la tensión indirecta en núcleos de carpeta asfáltica.



En la figura 4.4, se aprecia como para las mezclas de los tramos 4, 5, y 7, los valores de resistencia a la tensión indirecta medidos en los núcleos de la carpeta construida, son significativamente menores que los valores determinados en los especímenes Marshall, elaborados inmediatamente después de fabricada la mezcla. Esta diferencia en los valores de resistencia puede atribuirse a deficiencias en el proceso de traslado, tendido y compactación de la mezcla.

Este tipo de resultados se da principalmente en tramos que fueron construidos lejos de la planta de asfaltos, parte de eso explica el porqué de la diferencia entre los valores de especímenes Marshall y los núcleos de carpeta. Otro de los factores que afectan directamente estos valores es la temperatura del ambiente, ya que ésta al ser baja ayuda a que la mezcla pierda temperatura considerablemente, siendo este uno de los factores por el cual no se alcanza un valor aceptable de tensión indirecta.

La manera en la que es procesada la mezcla para conforma la carpeta tampoco es la mas adecuada, ya que en muchas ocasiones la mezcla el llegar al lugar no es tendida inmediatamente, dando esto como resultado una carpeta de mala calidad, a pesar de que la mezcla esté dentro de los valores normados.

En la figura 4.4 podemos ver que se puede encontrar una relación entre los resultados obtenidos por medio de la ecuación de la recta; esta relación nos dice que si conocemos el valor de la resistencia a la tensión indirecta en núcleos de carpeta podemos conocer el mismo valor en los especímenes Marshall y viceversa. Encontrando que el valor de la resistencia en especímenes Marshall es igual al 69% aproximadamente del valor de la resistencia en los núcleos de carpeta mas una constante definida por los valore graficados.



CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES

Al evaluar la calidad de una carpeta asfáltica con los procedimientos actuales, lo único que se logra es la relación entre el grado de densificación alcanzado y el peso volumétrico obtenido de los especímenes fabricados en el laboratorio mediante el método Marshall. Se corre el riesgo de considerar como adecuada una carpeta con fuertes deficiencias en su capacidad para resistir esfuerzos de tensión, que son los más importantes a que se ve sujeta la carpeta de todo pavimento, ya que se ha visto que mezclas asfálticas con niveles de densificación similares pueden presentar resistencias a la tensión muy diferentes. Esto porque la cohesión con la que cuentan las carpetas no es la adecuada como para resistir los esfuerzos a tensión indirecta.

Una mezcla asfáltica de buena calidad no siempre da como resultado una carpeta asfáltica de buena calidad. Para lograrlo se requieren acciones eficientes de traslado, tendido y compactación, lo cual dará como resultado valores adecuados de resistencia a la tensión de la carpeta terminada. Este parámetro puede utilizarse como un buen indicador de la calidad y no únicamente el grado de compactación, como ocurre frecuentemente.

Los niveles de densificación alcanzado por la carpeta asfáltica guardan, en general, una buena correlación con su resistencia a la tensión cuando la mezcla ha sido procesada adecuadamente; sin embargo, podrían no detectarse deficiencias en la capacidad para resistir esfuerzos de tensión, en mezclas con altas densidades, compactadas con altos niveles de energía, aplicados a mezclas que presentan deficiencias en su contenido de asfalto o baja temperatura de



compactación, que no alcanzan una cohesión suficiente, lo cual se ve reflejado al obtener bajos valores de resistencia a la tensión.

Se ha visto que mezclas de buena calidad, adecuadamente procesadas dan lugar a carpetas asfálticas también de buena calidad, medida ésta principalmente como su resistencia a la tensión y no únicamente con el grado de densificación alcanzado, que pudiera deberse a altas energías de compactación, con mezclas de mala calidad o compactadas a bajas temperaturas, lo cual se refleja como una baja resistencia a la tensión, debido a la baja cohesión alcanzada.

Las mezclas asfálticas ensayadas en los 7 tramos carreteros estudiados, muestran una buena correlación entre su resistencia a la tensión medida en especímenes Marshall y núcleos de la carpeta asfáltica terminada, esto permite ver la conveniencia de normar un valor mínimo de resistencia a la tensión en el producto terminado, es decir la carpeta asfáltica, como resultado de un procesamiento adecuado de la mezcla en las etapas de acarreo, tendido y compactación. Este valor mínimo aceptable puede fijarse cercano al obtenido en los especímenes Marshall. En donde la prueba Marshall solo nos sirve como un indicador de la homogeneidad de la producción, entiéndase esto la uniformidad en la granulometría y el valor del contenido de asfalto, mas no de la calidad del producto terminado.



REFERENCIAS

- Alonso Mota, Jesús y Leal Rocha, Carolina., 2010, Estudio del comportamiento a tensión indirecta de mezclas asfálticas, 7° congreso internacional de ingeniería, 2010, Querétaro, México.
- Alonso Mota J. y Pérez Jiménez F., 2006, Tesis Doctoral “Estudio del Proceso de Deformación y Agrietamiento por Fatiga de Mezclas Bituminosas sometida a Carga Cíclica”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Boyain y Goytia Flores, Jorge Alberto., 2009, Ingeniería aplicada a las vías terrestres, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Calderón Hinojosa, Felipe, (2007), Plan Nacional de Infraestructura 2007-2012, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, México.
- Camargo Moreno, Adeth M. y González Pérez, Miguel A., 2007, Diseño de mezclas asfálticas en caliente, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Campos Huratdo, Christian Arturo, Laboratorio de vías terrestres, Manual de prácticas, 2011. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Crespo Villalaz, Carlos., 2004, Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos., Tercera edición, Limusa, México.
- Foro Económico Mundial, The Global Competitiveness Report, 2006-2007.
- Garnica A. P., Flores F. M., Gómez L. A. y Delgado A. H., Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, 2005.
- Hewes, Laurence I., Oglesby, Clarkson H. Ingeniería de carreteras, calles viaductos y pasos a desnivel. Compañía editora Continental S. A. México D.F. 1980.



- Hornbostel, Caleb., 2002, Materiales para la construcción. Tipos, usos y aplicaciones., Limusawiley, México, DF.
- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso, 2008, Mecánica de suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Limusa, México, D.F.
- Kraemer C., Morilla Abad I y Del Val M. A., 1999, Carreteras II, Explanaciones, Drenaje, Firmes y Pavimentos, Madrid, España.
- Martínez A. y Pérez F., 2000, Tesis Doctoral, “Aseguramiento de la Calidad de Mezclas Bituminosas mediante la aplicación del ensayo de Tracción Indirecta en el Control de su Ejecución”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Norma NLT-346/9, Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.
- Rico R. y Del Castillo H., 1982, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Editorial Limusa, México.
- Olivera Bustamante, Fernando., 2002, Estructuración de vías terrestres., Compañía editorial continental, México, DF.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2002a, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M-MMP-4-04-002/02.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2008a, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Características de los Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N-CMT-4-04/08.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2008b, Normativa para la Infraestructura del Transporte, Calidad de Mezclas Asfálticas para
- Carreteras, N-CMT-4-04-01.
- Zárate Aquino, Manuel., 2007, Diseño de pavimentos flexibles, segunda parte., Asociación Mexicana de Asfaltos, A.C. México, D.F.