

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

**“ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 Y
ASFALTO MODIFICADO PG-82, UTILIZANDO LA PISTA DE ENSAYO
DE LABORATORIO UMICH”.**

TESIS

Como requisito parcial para obtener
el título profesional de

INGENIERO CIVIL

Presenta:

JOSÉ AYALA GARCÍA.

Director:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Morelia, Mich., Febrero del 2007.



A mis Padres...

Por su amor y apoyo incondicional en todo momento, por enseñarme a caminar en la vida, por creer en mí siempre y por ayudarme a realizar este sueño.

AGRADECIMIENTOS.

Antes que nada a Dios, por la maravillosa vida que me ha dado.

A mi Padre, José Ayala Tafoya., por su amor, su confianza, sus enseñanzas, y su gran apoyo siempre y en todo momento, por creer en mí, por darle a mi vida inspiración y ser mi mayor ejemplo a seguir.

A mi Madre, Ma.Guadalupe García Barajas., por su amor, su confianza y comprensión, por estar conmigo y apoyarme siempre en todos mis sueños, por creer siempre en mí, por ser la mamá ejemplar.

A mis Abuelos Jacinto † y Josefina †., por todo su amor y cariño, sus enseñanzas, por compartir a su lado hermosos momentos y hacerme sentir uno mas de sus hijos.

A mis Abuelos Teodulo † y Ma.Trinidad., por todo su cariño y amor, por su apoyo y enseñanzas.

A mis Hermanos Eduardo y Luis Fernando., por su cariño, por estar y compartir con ellos muchos momentos hermosos, por su gran apoyo siempre, (por sus risas y alegrías, Lalo y Luis) y por ser mis mejores amigos.

A mis Tíos y a toda mi familia por su cariño y apoyo siempre y ayudarme a salir adelante hasta en los momentos mas difíciles.

A Esther., por su amor y apoyo incondicional siempre, por darle a mi vida felicidad y mas...

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y La Facultad de Ingeniería Civil a quien debo mi formación profesional.

A mi Director de Tesis, Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, por compartir sus conocimientos, así como por todo el tiempo dedicado y el interés mostrado siempre para el correcto avance de la investigación, pero sobre todo por su gran amistad.

A mi compañero y amigo Salvador, por su apoyo y colaboración en este trabajo, y por su gran amistad durante toda la carrera.

A mis compañeros Edwin, Edén, y Arturo por su amistad y apoyo siempre, por compartir grandes momentos juntos.

Al M.I. Julio Alejandro Chávez Cárdenas, por su gran amistad y apoyo siempre, desde que llegue a la Facultad de Ingeniería Civil.

Y por ultimo agradecer a la empresa SURFAX, por su apoyo.

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 1.	
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	8
CAPÍTULO 2.	
MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS	
ASFÁLTICAS.....	12
2.1. Agregados Pétreos.....	12
2.1.1. Definición de agregados pétreos.....	12
2.1.2. Tipos de agregados pétreos.....	12
2.1.3. Propiedades de los agregados pétreos.....	13
2.1.4. Requisitos de calidad de materiales pétreos para carpetas asfálticas de	
Granulometría densa.....	14
2.2. Cementos Asfálticos.....	15
2.2.1. Generalidades de los asfaltos.....	15
2.2.2. Definición de Asfalto.....	16
2.2.3. Composición y estructura de los cementos asfálticos.....	17

2.3.4. Clasificación y Terminología de los Cementos Asfálticos.....	19
2.4.5. Propiedades de los Cementos Asfálticos.....	23
2.5.6. Asfaltos Modificados.....	29
2.6.7. Asfaltos de Grado PG.....	31

CAPÍTULO 3.

MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	35
3.1. Empleo de las Mezclas Asfálticas en la construcción de Pavimentos.....	35
3.2. Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas en los Pavimentos.....	35
3.3. Definición y Clasificación.....	40
3.3.1. Mezclas asfálticas en caliente.....	40
3.3.2. Mezclas en frío.....	41
3.3.3. Mezclas asfálticas por el sistema de riego.....	42
3.4. Tipo de Mezcla utilizada en el Presente Trabajo.....	42

CAPÍTULO 4.

MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	45
4.1. Método Marshall.....	46
4.2. Método SUPERPAVE.....	51

CAPÍTULO 5.

DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPA DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	61
5.1. Definición de Deformaciones Plásticas.....	61
5.2. Tipos de Deformaciones Plásticas (Roderas).....	62
5.2.1. Roderas por fallas en la subrasante.....	63
5.2.2. Roderas por fallas en la capa del asfalto.....	64
5.3. Mecanismos de Formación de Roderas.....	65
5.3.1. Solicitaciones de cargas a un pavimento.....	69
5.4. Factores que Intervienen en la Formación de Roderas.....	71

CAPÍTULO 6.

DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.....	82
6.1. Equipos para Ensayos de Rueda cargada ó Wheel Tracking Tests.....	83
6.1.1. Comparativa de las normas de ensayo.....	92
6.2. Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.....	102
6.2.1. Descripción del equipo.....	103
6.3. Fabricación de las Probetas.....	107
6.4. Descripción de la Prueba.....	108
6.4.1. Temperatura de ensayo.....	108
6.4.2. Presión de contacto de la rueda.....	109
6.4.3. Ejecución del ensayo.....	109
6.5. Obtención de Resultados.....	110

CAPÍTULO 7.

ENSAYOS DE LABORATORIO.....	112
7.1. Procedimiento Experimental.....	112
7.2. Caracterización del Material.....	113
7.2.1. Agregados pétreos.....	113
7.2.2. Cemento asfáltico.....	121
7.3. Diseño Marshall.....	123
7.4. Ensayo de Pista.....	126

CAPÍTULO 8.**RESULTADOS Y COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

ELABORADAS CON AC-20 Y ASFALTO MODIFICADO PG-82.....	130
8.1. Propiedades Físicas del Agregado Pétreo.....	130
8.2. Consideraciones Granulométricas en el Pétreo.....	131
8.3. Propiedades Físicas de los Asfaltos Empleados.....	133
8.4. Ensayo Marshall.....	134
8.5. Ensayo de Pista.....	137

CONCLUSIONES.....	153
-------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA.....	156
-------------------	-----

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un México en el que debemos reconocer que los pavimentos que tienen en sus carreteras no son los mismos que fueron en otras épocas. Debe aceptarse un muy importante cambio de circunstancias entre el momento actual y las épocas en que las carreteras mexicanas empezaron a ser construidas y en que en buena parte se desarrollaron.

La red nacional comenzó a formarse en el sentido actual a partir de la época 1920 - 1930 y creció a un ritmo relativamente moderado hasta 1950. Entre 1950 y 1970, la red fue objeto de un desarrollo muy importante y a partir de 1980 continuó creciendo significativamente, pero probablemente con un gradiente menor, si bien en los años de 1990 a 1995 tuvo lugar la incorporación de una red de modernas autopistas, y hasta la actualidad ha seguido creciendo teniendo hasta ahora, aproximadamente 300,000 km. de carreteras.

Obviamente durante todos estos años se han visto muchos cambios que a la vez produjeron, lo que podría considerarse un suceso muy importante en el transporte nacional y sus características. En todos esos años, la nación experimentó una transformación económica y estructural muy significativa, que fue haciendo aparecer una infraestructura industrial creciente, hasta alcanzar niveles importantes, de manera que una economía relativamente doméstica se fue convirtiendo en una economía necesitada de recurrir a la exportación de bienes para poder seguir su desarrollo. Lo anterior equivale a decir que el transporte como fenómeno económico fue adquiriendo una importancia cada vez mayor, de manera que

podría decirse que una actividad que hasta hace relativamente poco tiempo se centraba en comunicar, hoy se ha transformado en un quehacer mucho más complejo y que, además, se centra en la necesidad perentoria de comunicar en condiciones económicas competitivas y ello dentro de un mundo en donde toda la actividad del transporte evoluciona rápidamente, siempre con la vista fija en el logro de un transporte cada vez más barato, más rápido y más seguro.

Es por eso que no cabe duda que la ingeniería de pavimentos se debate en la actualidad ante la imperiosa necesidad de mejorar los procedimientos de diseño y específicamente en pavimentos asfálticos que son los que mas existen en nuestro país, con el objetivo último de lograr mejores desempeños de esas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y, sobre todo, de los costos de operación de los usuarios de los pavimentos.

Se han venido realizando investigaciones en mezclas asfálticas para estudiar su comportamiento y observar las posibles causas de sus fallas. Una de ellas es la que nos ocupa en el presente trabajo que son las deformaciones plásticas (roderas), que no es más que la formación de canales o surcos a lo largo del camino debido a la deformación que sufre la carpeta y que no es capaz de recuperar.

Las deformaciones plásticas permanentes fueron reconocidas como un problema dentro de la ingeniería de pavimentos desde los años 1970's y 1980's, y en los últimos 10 años se han llevado a cabo una serie de cambios significativos con respecto a los criterios empleados para el diseño de las mezclas asfálticas, los procesos de elaboración de las mezclas, la construcción de pavimentos, los criterios de calidad en la aceptación de los mismos; y todo estos cambios son debido en gran parte por los problemas de deformaciones plásticas permanentes (roderas). La presencia de las llamadas roderas en la superficie de un pavimento de mezcla asfáltica es consecuencia de las deformaciones plásticas debido a una baja estabilidad en la mezcla la cual depende fundamentalmente de dos variables que son: el cemento asfáltico y la granulometría empleada, de ahí se derivan una serie de factores como la densificación de los materiales, la temperatura medioambiental, el tipo de cemento

asfáltico, el tipo de agregados pétreos, las cargas de los vehículos (cargas por eje), la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos que ruedan por encima del pavimento, entre otros.

Diversos estudios elaborados en campo y en laboratorio indican que la densificación y la fluencia plástica de las capas de concreto asfáltico en un pavimento se podrían caracterizar de dos maneras:

a) Deformación plástica vertical, en cualquiera de las capas estructurales del pavimento. (Suelo de Cimiento, Sub-base, Base o Capa asfáltica).

b) Fluencia plástica horizontal en la capa superficial o de rodadura del pavimento.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Por tal motivo el trabajo que nos ocupa es el de la utilización de un cemento asfáltico modificado de grado PG-82 para la elaboración de una mezcla asfáltica, utilizando la normativa mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y evaluándola mediante la normativa española (NLT-173/00 “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio”). Con la finalidad de abatir en forma considerable el problema de las deformaciones plásticas.

Las mezclas utilizadas son mezclas asfálticas diseñadas mediante el procedimiento descrito en el manual AASHTO T-245-97 (2001) “Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus”, debido a que en la normativa de la SCT, el M-MMP-4-05-031 Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa, no se encuentra actualizado, y por tal motivo se utilizó el manual AASTHO, sabiendo de antemano que es el equivalente.

Para la realización de las mezclas asfálticas estudiadas, se utilizó material pétreo de un banco de la región (Banco de Sánchez Arreygui) y un cemento asfáltico convencional AC-20 y un modificado de grado PG-82 con un producto denominado Elvaloy.

Por otro lado cuando hablamos de Asfaltos de grado PG nos referimos a que son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones.

Las mezclas asfálticas se sometieron a ensayos en la máquina de pista para medir las deformaciones plásticas, utilizando la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, prototipo diseñado por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, basada en la normativa española (NLT-173/00) debido a que en México no se cuenta con una normativa para medir las deformaciones plásticas en mezclas asfálticas.

OBJETIVOS.

Objetivo General.

Evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto convencional AC-20 y asfalto modificado PG-82 ante la aparición de deformaciones permanentes, utilizando la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Objetivos Particulares.

- 1) Identificar los principales factores que ocasionan las deformaciones plásticas permanentes en los pavimentos.
- 2) Evaluar mediante el Ensayo de Pista del laboratorio, la severidad de las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas densas (fabricadas en caliente) empleando dos tipos de asfalto, uno convencional y uno modificado.
- 3) Verificar la influencia que tienen en las deformaciones plásticas, cada uno de los dos tipos de asfalto.
- 4) Comprobar el efecto que tiene la carga aplicada (traducida en el ensayo de pista a presión de contacto entre la rueda y la probeta de asfalto) en la severidad de las deformaciones plásticas.

Capítulo.

1

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

Los pavimentos de carreteras están formados por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se apoyan sobre una terracería obtenida por el movimiento de tierras.

Los pavimentos deben proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes que soporten las cargas de tráfico rodado durante un periodo de tiempo determinado. Deben repartir las presiones impuestas por el tráfico pesado, de forma que a la terracería o terreno natural sólo llegue una pequeña parte de aquellas, compatible con su capacidad de soporte y además deben proteger a la terracería de la intemperie y en especial de las precipitaciones.

Los pavimentos de carreteras deben cumplir con una serie de características funcionales, que corresponden prácticamente a las de la superficie del pavimento o capa de rodadura y

que afectan directamente a los usuarios. Las principales características superficiales que los pavimentos deben reunir son una adecuada resistencia al deslizamiento, una buena regularidad superficial del pavimento tanto transversal como longitudinal, un reducido ruido de rodadura, unas propiedades de reflexión luminosa adecuadas para la conducción nocturna, y un desagüe superficial rápido para evitar hidroplaneo y las proyecciones de agua a otros vehículos

Por otra parte, las características estructurales de los pavimentos están relacionadas con las de los materiales empleados en sus diferentes capas y con sus espesores. Su diferente deformabilidad da lugar a discontinuidades de tensiones y/o deformaciones en los planos de contacto, por lo que el proyecto de una capa ha de armonizarse con el de las restantes a fin de conseguir un buen comportamiento estructural conjunto.

Los pavimentos de las carreteras se diferencian y clasifican de acuerdo a los materiales que los componen y a la forma que tienen de distribuir los esfuerzos y deformaciones generados por el tráfico.

Siguiendo los criterios tradicionales, suelen clasificarse en dos grandes grupos, pavimentos flexibles y pavimentos rígidos, en este trabajo nos centraremos en los pavimentos flexibles o asfálticos que están formados por una serie de capas granulares y por lo menos por una capa bituminosa de rodadura. Inicialmente, la resistencia a la deformación de las capas de los pavimentos flexibles era decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie, sin embargo, el aumento del tráfico y de las cargas generadas por él, han llevado a la creación de pavimentos semirígidos, con capas tratadas con cemento o con un espesor importante (15 cm o más) de mezclas bituminosas (semiflexibles). Los pavimentos semirígidos y semiflexibles se incluyen en el grupo de los flexibles ya que contienen un pavimento bituminoso, pero su comportamiento estructural es diferente, con capas inferiores de igual o mayor rigidez que las superiores.

Los pavimentos flexibles constan de varias capas denominadas de arriba abajo carpeta, base, y subbase respectivamente. La carpeta, constituida por una o dos capas de mezcla bituminosa denominada capa de rodadura y capa intermedia, es la parte superior del pavimento y la que soporta directamente las solicitaciones del tráfico, aportando además las características funcionales. La carpeta tiene la función estructural de absorber los esfuerzos horizontales y parte de los verticales.

La base es la capa del pavimento situada debajo de la carpeta y su función es eminentemente resistente, absorbiendo la mayor parte de los esfuerzos verticales. Para tráficos medios y ligeros se utiliza las bases granulares de material triturado, para tráficos pesados se emplean materiales tratados con un ligante o cloglomerante. Además de los anteriores, existen algunos tipos especiales de base como pueden ser la gravaescoria, gravaemulsion, gravaceniza y suelocemento.

Por último, la subbase es la capa situada debajo de la base y sobre la terracería, su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme, además de cumplir con una función drenante. Esta capa puede no ser necesaria con terracerías granulares de elevada capacidad de soporte. La subbase puede estar constituida por gravas y arenas naturales o de machaqueo, suelos estabilizados con cemento, escorias cristalizadas de horno alto, etc.

Este es el tipo de pavimentos que con mas frecuencia se utilizan en nuestro país, y con justa razón podemos decir esto ya la mayor parte de nuestras carreteras son de Pavimentos flexibles, y todo indica seguirá siendo así en un futuro.

Capítulo 2

MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

2.1 Agregados Pétreos.

2.1.1 Definición de agregados pétreos.

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con cementos asfálticos. (Smith M. R. and L. Collins, 1994).

2.1.2 Tipos de agregados pétreos.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados Naturales.

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

b) Agregados de Trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera ó de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

c) Agregados Artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

d) Agregados Marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.1.3 Propiedades de los agregados pétreos.

Las propiedades de los agregados se pueden conceptuar bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados, o individuales, y otro como conjunto.

Propiedades individuales.

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc. Asimismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.

Propiedades de conjunto.

Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto a influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.1.4. Requisitos de calidad de materiales pétreos para carpetas asfálticas de granulometría densa.

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 la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con lo que se indicas a continuación:

Para nuestro caso se realizó con una intensidad de tránsito (ΣL), mayor de un (1) millón de ejes equivalentes, el material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en tabla 2.1 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 2.2 .

Tabla 2.1.- Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para $\Sigma L > 10^6$)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación (in)	9.5	12.5	19	25	37.5
		(3/8)	(1/2)	(3/4)	(1/2)	(1 1/2)
		Porcentaje que pasa				
50	2					100
37.5	1 1/2				100	90 -- 100
25	1			100	90 -- 100	74 -- 90
19	3/4		100	90 -- 100	79 -- 90	62 -- 79
12.5	1/2	100	90 -- 100	72 -- 90	58 -- 71	46 -- 60
9.5	3/8	90 -- 100	76 -- 90	60 -- 76	47 -- 60	39 -- 50
6.3	1/4	70 -- 81	56 -- 69	44 -- 57	36 -- 46	30 -- 39
4.75	Nº 4	56 -- 69	45 -- 59	37 -- 48	30 -- 39	25 -- 34
2	Nº 10	28 -- 42	25 -- 35	20 -- 29	17 -- 24	13 -- 21
0.85	Nº 20	18 -- 27	15 -- 22	12 -- 19	9 -- 16	6 -- 13
0.425	Nº 40	13 -- 20	11 -- 16	8 -- 14	5 -- 11	3 -- 9
0.25	Nº 60	10 -- 15	8 -- 13	6 -- 11	4 -- 9	2 -- 7
0.15	Nº 100	6 -- 12	5 -- 10	4 -- 8	2 -- 7	1 -- 15
0.075	Nº 200	2 -- 7	2 -- 6	2 -- 5	1 -- 4	0 -- 3

Tabla 2.2.- Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (Para $\Sigma L > 10^6$).

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas; %, máximo	35
Partículas lageadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

2.2 Cementos Asfálticos.

2.2.1 Generalidades de los asfaltos.

Dentro del nombre genérico de cementos asfálticos se incluyen materiales de distinta procedencia, los asfaltos y los alquitranes, que tienen en común su aspecto y una serie de propiedades aglomerantes. Ambos son materiales termoplásticos, viscosos, su color es negro y están formados por una mezcla compleja de hidrocarburos.

Actualmente en carreteras se usa el asfalto, que puede ser de origen natural (rocas o lagos asfálticos) o artificial el cual es un producto de la refinación del petróleo crudo, en la Figura 1.1, se ilustra el proceso de destilación para la obtención del cemento asfáltico en refinería. Dadas sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, riegos de liga, riegos de impregnación, entre otros.

El empleo de asfaltos naturales, tiene una limitada utilización aunque son por lo general de excelente calidad, con la incorporación de este tipo de asfaltos a las mezclas asfálticas, se logran construir pavimentos muy resistentes a las deformaciones plásticas y a la vez pueden tener una alta flexibilidad.

La mayoría de los asfaltos son semisólidos o sólidos a temperatura ambiente, su manipulación requiere su previo calentamiento, con la finalidad de reducir su consistencia a un valor admisible para la operación deseada: ya sea bombeo (en el manejo), la envuelta de agregados, riegos asfálticos, producción de mezclas asfálticas en caliente, entre otros.

El calentamiento se realiza en depósitos apropiados, convenientemente protegidos y aislados, en camiones cisterna o en camiones con tanques regadores, con equipos de serpentines de aceite, quemadores o con bombas en circuito cerrado para evitar sobrecalentamientos.

2.2.2 Definición de asfaltos.

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presenta en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro, son productos de la destilación natural o artificial del petróleo y es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, denominados también pavimentos asfálticos o pavimentos bituminosos, en virtud de este dúctil, flexible y tenaz material que los constituye y caracteriza.

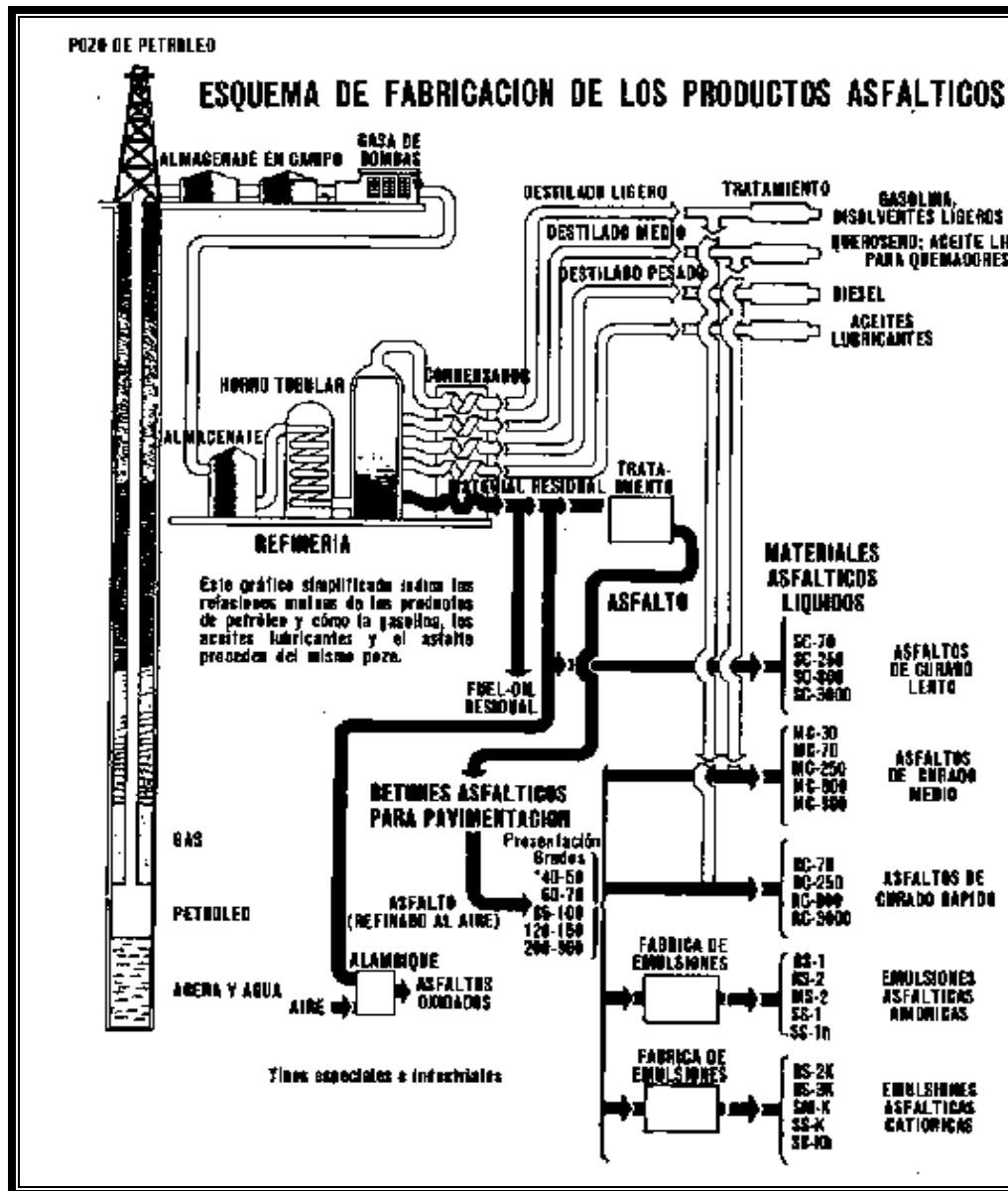


Figura.2.1 Diagrama de fabricación de los productos asfálticos. Refinería

2.2.3 Composición y estructura de los cementos asfálticos.

El asfalto o betún, desde el punto de vista de su naturaleza, está constituido por una mezcla compleja de hidrocarburos cuyos componentes principales son el carbono y el hidrógeno y en mucha menor proporción oxígeno, azufre, nitrógeno y metales pesados como el níquel y el vanadio, todos de diferente peso molecular, solubles en sulfuro de carbono, que forman

una solución coloidal, en la que la fase discontinua la constituye la fracción pesada, denominada asfáltenos cuyo peso molecular oscila de 4000 a 7000 y la fase continua la constituye un fluido aceitoso formado por la fracción ligera, denominada maltenos cuyo peso molecular oscila entre 700 a 4000. A su vez la parte malténica puede subdividirse en tres fracciones principales, parafinas, con pesos de 600 a 1000, resinas, con pesos de 1000 a 2000 y aceites aromáticos, con pesos de 2000 a 4000.

Dependiendo de la concentración de los asfáltenos, se distinguen dos tipos de asfaltos:

1. Tipo Sol (movimiento libre de las micelas): tienen una menor proporción de asfáltenos, que se encuentran agrupados en cadenas homogéneas perfectamente dispersas en el medio aceitoso formado por los maltenos y sus propiedades varían considerablemente con la temperatura. Experimentan fuertes deformaciones plásticas cuando se utilizan como cemento de una mezcla asfáltica.
2. Tipo Gel (estructura micelar empaquetada): tienen una mayor proporción de asfáltenos y resinas, que se disponen formando una estructura reticular muy compleja, dejando unos espacios libres, en los que se encuentran los maltenos. Esta estructura reticular rodeada de un fluido viscoso proporciona a este tipo de betunes un comportamiento bajo carga visco-elástico. Es menos susceptible a la temperatura y más adecuado para soportar las sollicitaciones del tráfico, es decir, son los empleados en la construcción de carreteras.

Cabe mencionar que no todos los crudos del petróleo proporcionan mediante la refinación asfaltos aptos para la construcción de pavimentos flexibles, como sucede con los crudos de la base parafinita los cuales están constituidos fundamentalmente por hidrocarburos saturados, que requieren un proceso complementario de oxidación parcial. Los mejores asfaltos se pueden obtener a partir de los crudos de base nafténica, constituidos fundamentalmente por hidrocarburos no saturados. El comportamiento reológico de los asfaltos depende de su composición química, la cual depende a su vez de su fuente de procedencia y del proceso de refinación.

2.2.4 Clasificación y terminología de los cementos asfálticos.

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Clasificación de los materiales asfálticos.

Material asfáltico	Vehículo para su ampliación	Usos mas comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

Cementos Asfálticos

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

Según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 2.4, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

Tabla 2.4 Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C.

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (Poises)	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1.17. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1 000 ± 200)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1.17 - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1.17.
AC-20	200 ± 40 (2 000 ± 400)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 1.17 - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1.17
AC-30	300 ± 60 (3 000 ± 600)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 1.17. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 en la Figura 1.17 - En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

Emulsiones Asfálticas

Las emulsiones asfálticas son los materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas *aniónicas* cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas *cationicas*, cuando les confiere polaridad electropositiva.

Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se debe utilizar en la elaboración de éstas últimas.
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual a dos (2) por ciento ó menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

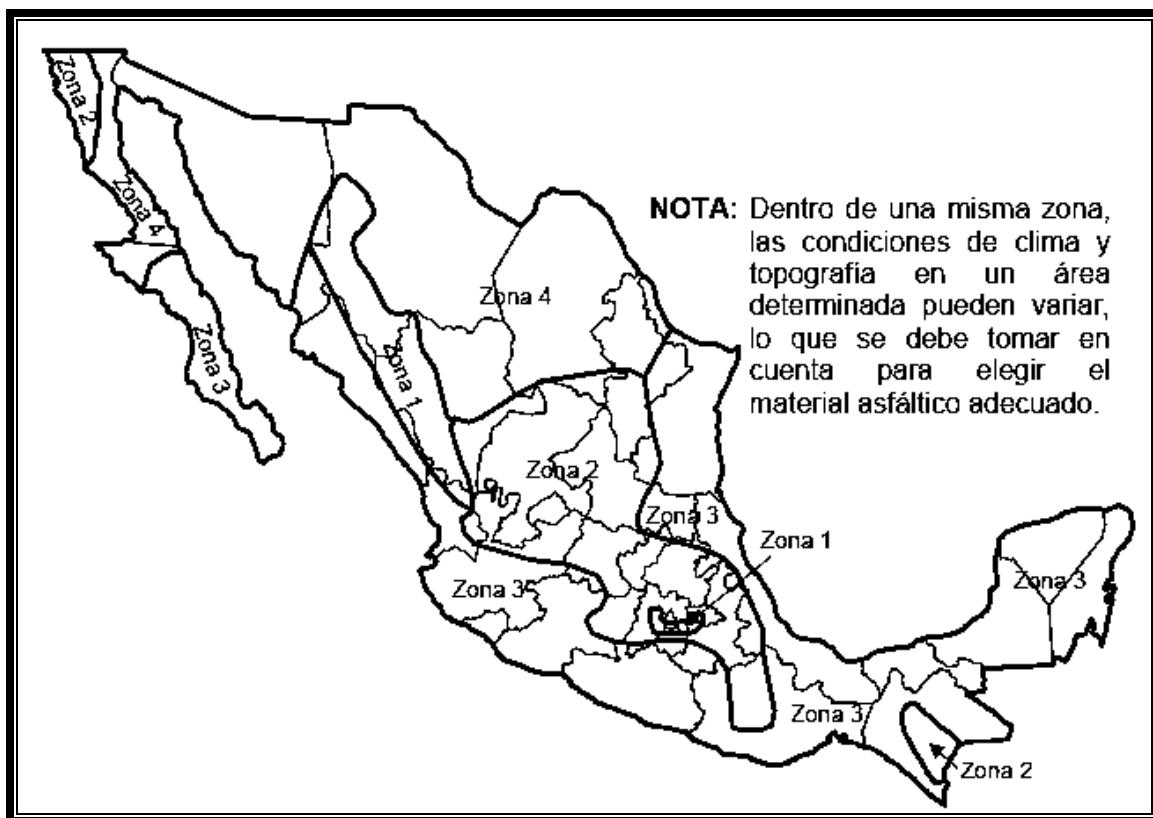


Figura 2.2 .- Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C.

- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.
- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Clasificación de las emulsiones asfálticas.

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60	Rompimiento medio	
EAR-60	60		
EAR-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60	Para impregnación	
EAI-60	60		
ECR-60	60		
ECR-65	65	Rompimiento rápido	
ECR-70	70	Rompimiento medio	
ECM-65	65		
ECL-65	65		
ECI-60	60		
ECS-60	60		
		Sobrestabilizada	Catódica

Asfaltos Rebajados

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Clasificación de los asfaltos rebajados.

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR-3	Rápida	Nafta, gasolina
FM-1	Media	Queroseno

2.4.5 Propiedades de los Cementos Asfálticos.

A continuación se enlistan las propiedades de los cementos asfálticos, que son resultado de ensayos empíricos o semi-empíricos aunque se plantea determinar sus prestaciones o rendimiento a partir de las características reológicas.

Densidad.

La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0.9 - 1.4 kg/dm³. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos. La densidad puede darnos idea de las impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro.

La densidad relativa de un cemento asfáltico es la razón entre el peso de un determinado volumen de cemento y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, por ejemplo 25 grados centígrados. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa. Se determina con un picnómetro. Los asfaltos tienen una densidad relativa a 25 grados centígrados del orden de 1.03.

Penetración.

La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta propiedad, por sí sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

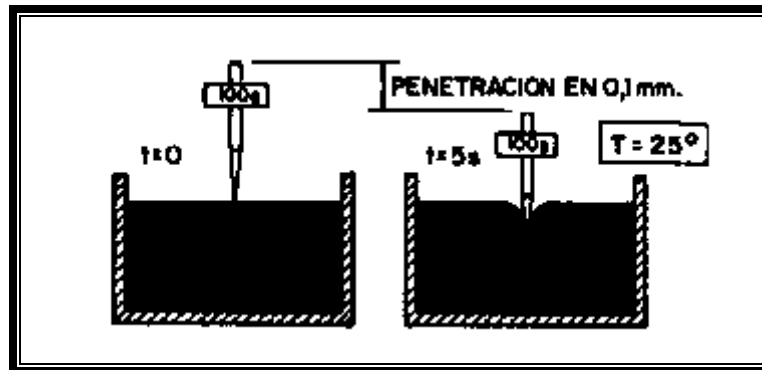


Figura 2.3 Ensayo de penetración.

Viscosidad.

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un cemento asfáltico es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad de los cementos hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

Sólo para ciertas investigaciones se utilizan viscosímetros capilares para la obtención de la viscosidad cinemática absoluta del producto a una temperatura. En la práctica se suele recurrir a determinar la viscosidad relativa. Los viscosímetros más utilizados son los de Saybolt (Furol o Universal). Se basan en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas.

Si sometemos un fluido a la acción de una fuerza, se produce una deformación de dicho

fluido. Pero esta deformación corresponde solamente a parte de la energía aplicada al fluido. El resto de la energía aplicada se transformará en energía calorífica, debido al frotamiento interno que se produce en el fluido. Cuando éste sea viscoso, esta energía empleada en vencer los frotamientos internos será grande.

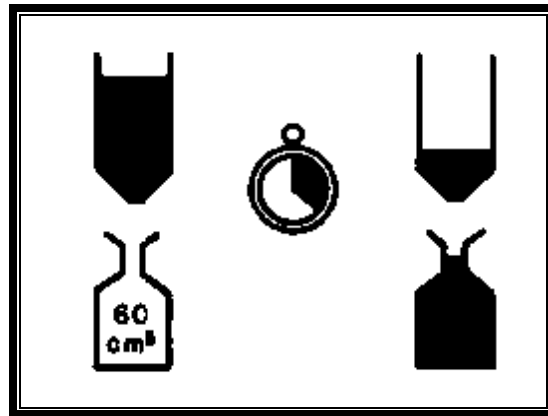


Figura 2.4 Determinación de la Viscosidad Relativa.

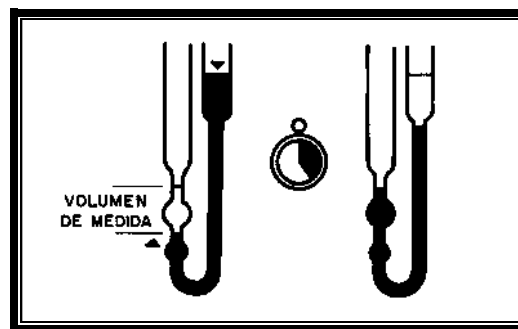


Figura 2.5 Viscosímetro Capilar.

Susceptibilidad térmica.

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, el cual éste último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

La Susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que le daremos.

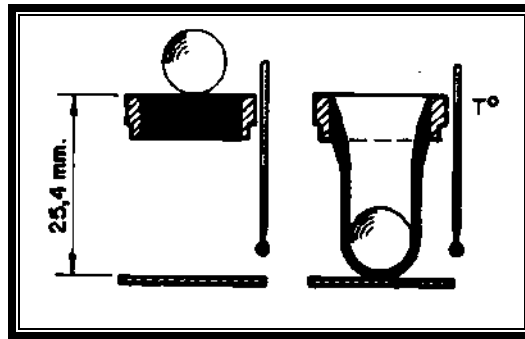


Figura 2.6 Ensayo de Punto de Reblandecimiento (Anillo y Bola).

Ductilidad.

La ductilidad se mide por el alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante.

Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que se presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico.

Puede comprobarse experimentalmente que para un mismo material, la ductilidad crece cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye.

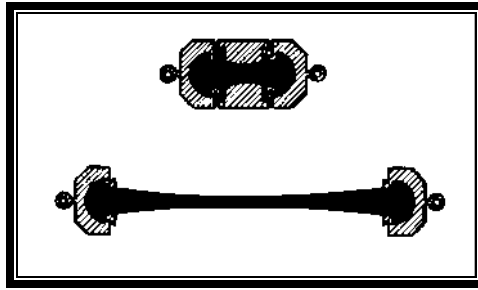


Figura 2.7 Ensayo de Ductilidad.

Punto de Inflamación.

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. Su determinación es interesante, puesto que cuando comprobemos que el punto de inflamación está 25 o 30 grados centígrados por encima de la temperatura a la que manejamos el asfalto para su utilización en la obra, procederemos a estas operaciones con notables precauciones. El punto de inflamación de un asfalto debe de estar alrededor de los 215 grados centígrados.

Volatilidad.

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad nos da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

Solubilidad.

Por definición, un asfalto es totalmente soluble en sulfuro de carbono. Si al realizar el ensayo de un material quedara un residuo insoluble, el resultado del ensayo nos permitiría juzgar sobre la cantidad de asfalto puro que contiene dicho material. Por otro lado, la propiedad de solubilidad, sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto de que consta un pavimento.

Fragilidad.

La fragilidad estática, se caracteriza por la rotura de un material en cuanto se sobrepasa su límite elástico y sin que haya sufrido una deformación plástica apreciable. Un material que sufre deformaciones lentas de carácter plástico puede romperse bajo el efecto de un choque. Se dice entonces que el material no tiene tenacidad.

Cohesión.

Esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla de un producto asfáltico y un agregado pétreo para romperse por tracción sin que falle la adherencia entre el producto asfáltico y el agregado pétreo.

Adherencia.

Está representada como la resistencia que presenta a despegarse un producto asfáltico de un agregado pétreo, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y de otro cuerpo.

Envejecimiento.

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el pavimento, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores. Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el cemento asfáltico está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del cemento, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

Esto quiere decir que si se quieren comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en el que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar algunas de sus propiedades.

Los productos asfálticos son colocados en obra en un estado plástico, pero con el tiempo se van endureciendo y se producen entonces un aumento de la cohesión al mismo tiempo que crecen la viscosidad y la dureza. Estos fenómenos tienen lugar hasta que se ha alcanzado una dureza determinada y para valores mayores de esta dureza crítica, la cohesión disminuye. Entonces el producto asfáltico se vuelve frágil y es muy sensible a los esfuerzos bruscamente aplicados. Esto se debe a que los productos asfálticos sufren durante su uso la acción de diversos agentes naturales que producen modificaciones irreversibles y pérdidas en sus propiedades iniciales.

Permeabilidad.

La impermeabilidad de los materiales asfálticos es una de las características más típicas. Se debe, en primer lugar, a que la solubilidad del agua en dichos materiales es muy pequeña y, además, a la elevada viscosidad de tales productos.

En general, cuanto menor es la penetración de un producto asfáltico, más lentamente se difunde el agua a través de él.

2.5.6 Asfaltos modificados.

Definición y Clasificación.

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material

asfáltico, conservándola aun en el agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensiones repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo, como lo especifica la norma N-CTM-4-05-002/01. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

Polímero tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno en polímeros elastomeritos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Polímero tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Polímero tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo

elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Hule molido de neumáticos

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado en base con el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

Corresponde al proyectista la selección del tipo de modificar a emplear y su dosificación, para cumplir con los parámetros de comportamiento deseados.

Los materiales asfálticos modificados, dependiendo del tipo de modificador empleado cumplirán, en general, con los requisitos de calidad que se indican a continuación; sin embargo, podrán existir variaciones si el proyectista así lo considera en su diseño.

Mezclado de los modificadores con el cemento asfáltico

El mezclado de los modificadores, se efectuara en una planta industrial, utilizando los equipos especiales adecuados para el tipo de modificador que se emplee, a menos que, de acuerdo con las indicaciones del proveedor del modificador, no se requiera de dicho equipo.

2.6.7 Asfaltos de grado PG.

Son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (performance) adecuado para resistir deformaciones o

agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra, y forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras desarrollado por la Unión Americana, conocida como la Tecnología SHRP.

Grado de desempeño (PG)

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de sesenta y cuatro (64) a ochenta y ocho (88) grados Celsius y las mínimas, de menos cuarenta (-40) a menos veintidós (-22) grados Celsius.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los tres (3) grados PG que se indican en la figura 2.8, como lo marca la norma N-CTM-4-05-004/05 de la SCT, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestran en la misma Figura, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado. La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2)

toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de diez (10) años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la Tabla 2.7.



Figura 2.8 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos
Grado PG

Tabla 2.7 Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) ^[1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceros)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 70	PG 76
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
10^6	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (ESAL), esperado guante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

Capítulo 3

MEZCLAS ASFÁLTICAS.

3.1 Empleo de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico al terreno para que sean soportadas por ésta.

3.2 Funcionalidad de las mezclas asfálticas en los Pavimentos.

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los pavimentos.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o

incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del pavimento residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al pavimento.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del pavimento están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada

pavimento. Por ejemplo, son fácilmente asequibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad de los vehículos, en los métodos de diseño de pavimentos.

Como resumen, se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:
 - Resistencia al deslizamiento.
 - Regularidad.
 - Permeabilidad adecuada.
 - Sonoridad.
 - Color, entre otras.

Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario.

Por ejemplo, en los países fríos, en particular en el centro de Europa, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no proporcionan la textura

adecuada, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla como son la incrustación en la superficie de gravillas o al abujardado en caliente.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitudes a que están sometidas. Actualmente la modificación de cementos asfálticos se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

Propiedades de las mezclas asfálticas para capas inferiores.

Las capas de espesor apreciable de un pavimento tienen una misión estructural fundamental para absorber la mayor parte de las solicitudes del tráfico, de forma que éstas lleguen convenientemente disminuidas a las capas inferiores, cimiento de la carretera. Existen tendencias y países que llegan a utilizar paquetes asfálticos de gran espesor que forman la losa estructural fundamental del pavimento. En otros casos la función resistente radica en la colaboración con otras capas de materiales granulares o hidráulicos.

Tabla 3.1 Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas.

Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas
Seguridad
Resistencia al deslizamiento
Regularidad transversal
Visibilidad (marcas viales)
Comodidad
Regularidad longitudinal
Regularidad transversal
Visibilidad
Ruido
Durabilidad
Capacidad de soporte
Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente
Ruido
Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad

Tabla 3.2 Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas.

Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas
Textura superficial
Conductividad hidráulica
Absorción de ruido
Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico)
Resistencia a la figuración por fatiga
Resistencia a las deformaciones plásticas permanentes
Módulo de rigidez
Resistencia a la pérdida de partículas
Durabilidad (en relación con el clima)
Resistencia al lavado por el agua
Resistencia a la figuración térmica
Resistencia a la figuración por reflexión
Resistencia al envejecimiento
Trabajabilidad
Compactibilidad
Resistencia a la segregación agregado grueso/fino
Resistencia a la segregación agregado/ligante

Tabla 3.3 Propiedades significativas de mezclas asfálticas para cada capa.

Propiedades técnicas	Rodadura	Significativas para		
		Intermedia	Base	Subbase
A. resistencia al deslizamiento				
A1. Macrotextura	x	/	/	/
A2. Microtextura	x	/	/	/
B. Propiedades mecánicas (relacionadas con el tráfico)				
B1. Resistencia a fatiga/iniciación de grietas	x	x	x	/
B2. Resistencia a la propagación de grietas	x	x	x	/
B3. Resistencia a la deformación plástica permanente	x	x	x	/
B4. Módulo de rigidez	x	x	x	x
B5. Resistencia a la pérdida de partículas/general	1)	/	/	/
B.6 Resistencia a la pérdida de partículas/neumáticos con clavos	2)	/	/	/
C. Propiedades de durabilidad (relacionada con el clima)				
C1. Resistencia al lavado por el agua	x	x	x	x
C2. Resistencia al envejecimiento	x	/	/	/
C3. Resistencia a la figuración térmica	x	/	/	/
D. Propiedades relativas a la trabajabilidad				
D1. Compactibilidad	x	x	x	x
D2. Sensibilidad a la segregación/agregado grueso/fino	x	x	x	x
D3. Sensibilidad a la segregación/escurrimiento de cemento	x	/	/	/
E. Otras propiedades				
E1. Conductividad hidráulica	1)	/	/	/
E2. Absorción de ruido	1)	/	/	/

1) Sólo en mezclas drenantes

2) Sólo en zonas en las que se permitan neumáticos con clavos.

3.3. Definición y Clasificación.

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo.

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasifican como sigue:

3.3.1 Mezclas asfálticas en caliente

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

Mezcla asfáltica de granulometría densa

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/5 in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

Mezcla asfáltica de granulometría abierta.

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal doce coma cinco (12,5) milímetros (1/2 in) y seis coma tres (6,3) milímetros (1/4 in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula E.

de la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Estas mezclas normalmente 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 se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año.

3.3.2. Mezclas asfálticas en frío.

Son las elaboradas en frío, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos.

Las mezclas asfálticas en frío se clasifican a su vez en:

Mezclas asfálticas 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 treinta y siete coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad del tránsito (ΣL) es igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera 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.

Mortero asfáltico.

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de dos coma treinta y seis (2,36) milímetros (N°8), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

3.3.3 Mezclas asfálticas por el sistema de riego.

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con agua, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes que, según su denominación, satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Las carpetas por el sistema de riego se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos pueden ser premezcladas 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 derramamiento y al pulimento.

4.4 Tipo de Mezcla utilizada en el Presente Trabajo.

Para el trabajo que nos ocupa se utilizó una mezcla en caliente de granulometría densa con tamaño máximo de agregado de 19mm diseñada por el método Marshall

Mezcla asfáltica de granulometría densa diseñada por el método Marshall.

Las mezclas asfálticas diseñadas mediante el procedimiento descrito en el Manual AASHTO T-245-97 (2001) “Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus”, de acuerdo con el tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del

pavimento (ΣL), cumplirán con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.4 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 3.5, en función del tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla, esto de acuerdo a la norma N-CTM-04-04, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Tabla 3.4 Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ⁽¹⁾	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ⁽²⁾
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5340 (1200)	8000 (1800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 -- 4 (8 -- 16)	2 -- 3.5 (8 -- 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	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), esperando durante la vida útil del pavimento.

(2) Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8.2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Tabla 3.5 Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla [1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación (in)	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9.5	3/8	14	15	16
12.5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	1 1/2	10	11	12

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

Capítulo 4

MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha utilizado diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; los más comúnmente utilizados son el método Marshall y por cuestiones de diseño más representativas se ha venido incorporando un método relativamente nuevo llamado Superpave. Pero aún así, es el Marshall el más común en la práctica mexicana.

El proceso de diseño de una mezcla asfáltica, independientemente del método de diseño utilizado, involucra la selección del agregado, selección del asfalto; compactación de los especímenes de prueba, el cálculo de los parámetros volumétricos; y la determinación del contenido de asfalto óptimo.

Existen varios métodos para diseño de mezclas; por varias décadas ha tenido gran difusión y aceptación el procedimiento conocido como método Marshall. Sin embargo, hoy en día, la confiabilidad de sus resultados es cuestionada, pues diversos estudios e investigaciones han concluido que se tienen problemas que derivan de la naturaleza empírica de los procedimientos de laboratorio que sustentan este método. Adicionalmente, el método Marshall no fue desarrollado pensando en el comportamiento de la mezcla asfáltica a lo largo del tiempo ni en el efecto que tienen otros aspectos importantes en su desempeño.

Por lo anterior, se llegó a la conclusión de que era necesario contar con un procedimiento alternativo, que permitiera un método de diseño más representativo y confiable, además de estar asociado a procedimientos y ensayos que evalúen el comportamiento y desempeño de la mezcla a lo largo del tiempo.

En respuesta a lo anterior, como parte del programa de investigación en carreteras SHRP (Strategic Highway Research Program), en los Estados Unidos se desarrolló un procedimiento de dosificación de mezclas asfálticas denominado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Actualmente en la mayoría de los estados de la Unión Americana y en algunos de Canadá se han implementado totalmente las especificaciones del asfalto, las especificaciones del agregado, y el procedimiento de diseño de la mezcla.

En este capítulo se presentan los requisitos de la mezcla que deben cumplirse para ambos métodos de diseño.

4.1 Método Marshall

El método de diseño de mezclas Marshall fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró el procedimiento de prueba Marshall.

El método original de Marshall sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con tamaño máximo de 25 mm (1"). Por su parte, el método Marshall modificado se desarrolló para tamaños de agregado mayores a 38 mm (1,5"); fue para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados, en términos de estimar el comportamiento en campo, se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba de 64 mm (2 ½”) de altura y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall de diseño de mezclas son la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrollará cuando es ensayado a una temperatura de 60 °C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100”), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad (Asphalt Institute MS-2, 1996).

El método Marshall sólo establece requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la mezcla. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las dependencias encargadas del desarrollo de la infraestructura; en el caso de México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es el organismo que establece los requisitos que deben cumplirse para diseño y control de mezclas asfálticas. En las Tablas 4.1 a 4.5 se presentan los requisitos señalados por la SCT para el material pétreo, material asfáltico, y granulometría en la elaboración de mezclas asfálticas.

Requisitos del agregado pétreo

Tabla 4.1 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de Granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento Fuente: (SCT, 2003).

Tabla 4.2 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L > 10^6$)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	30
Partículas alargadas y lejeadas, %	35
Equivalente de arena, % mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento Fuente: (SCT, 2003).

Requisitos del asfalto

Tabla 4.3 Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C

Características	Clasificación			
Del cemento original a 60°C	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C Pa.s(P ⁽¹⁾)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s= 1centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C;s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Claveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad, %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandamiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Pérdida por calentamiento, %, máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ⁽¹⁾), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductibilidad a 25°C y 5 cmm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

Fuente: (SCT, 2005)

Requisitos de la granulometría

Tabla 4.4 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12.5 mm (1/2 ")	19 mm (3/4 ")	25 mm (1 ")	37,5 mm (1 1/2 ")	50 mm (2 ")
50	2"	---	---	---	---	---
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90-100
25	1"	---	---	100	90-100	76-90
19	3/4"	---	100	90-100	79-92	66-83
12,5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	No.4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	No.10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	No.20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	No.40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	No.60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	No.100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	No.200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento
Fuente: (SCT, 2003)

Tabla 4.5 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12,5 mm (1/2 ")	19 mm (3/4 ")	25 mm (1 ")	37,5 mm (1 1/2 ")	50 mm (2 ")
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90-100
25	1"	---	---	100	90-100	74-90
19	3/4"	---	100	90-100	79-90	62-79
12,5	1/2"	100	90-100	72-90	58-71	46-60
9,5	3/8"	90-100	76-90	60-76	47-60	39-50
6,3	1/4"	70-81	56-69	44-57	36-46	30-39
4,75	No.4	56-69	45-59	37-48	30-39	25-34
2	No.10	28-42	25-35	20-29	17-24	13-21
0,85	No.20	18-27	15-22	12-19	9-16	6-13
0,425	No.40	13-20	11-16	8-14	5-11	3-9
0,25	No.60	10-15	8-13	6-11	4-9	2-7
0,15	No.100	6-12	5-10	4-8	2-7	1-5
0,075	No.200	2-7	2-6	2-5	1-4	0-3

ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento
Fuente: (SCT, 2003)

Requisitos volumétricos

Los requisitos volumétricos de diseño Marshall son para un contenido de aire de 4%, y están basados en los volúmenes de tránsito estimados para la vida de diseño del pavimento y en los requisitos de compactación del espécimen. La Tabla 4.6 indica los requisitos volumétricos de la metodología Marshall.

Tabla 4.6 Requisitos volumétricos de mezclas Marshall

Parámetro	Números de ojos equivalentes de diseño ΣL ⁽¹⁾	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 \Sigma L \leq 10^{(2)}$
Número de golpes en cada una de las caras del espécimen	50	75
Estabilidad; N (lb) m/n	5338 (1 200)	8000 (18000)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2-4 (8-16)	2-3, 5 (8-14)
Porcentaje de vacíos de aire	3-5	3-5
Porcentaje de vacíos en el mineral	Ver tabla 3,7	
Porcentaje de vacíos llenos con asfalto	65-78	65-75

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

(2) Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere diseño especial de la mezcla

Fuente: (SCT, 2002)

Tabla 4.7 Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Tamaño máximo nominal del agregado		Porcentaje mínimo		
		Porcentaje de vacíos de aire de diseño		
mm	Designación	3,0	4,0	5,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	½	13,0	14,0	15,0
19,0	¾	12,0	13,0	14,0
25,0	1,0	11,0	12,0	13,0
37,0	1,5	10,0	11,0	12,0

Todas las propiedades medidas y calculadas con el contenido de asfalto son evaluadas comparándolas con los requisitos de la Tabla 4.6. Si todos se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no cumpla, se hacen ajustes o se rediseña la mezcla.

4.2 Metodología SUPERPAVE

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo.

Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento.

Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados.

El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente y su correcto funcionamiento.

Ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que

pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

Requisitos del agregado

La metodología SUPERPAVE establece los requisitos de calidad del agregado a través de la evaluación de propiedades denominadas de consenso y de origen. La Tabla 8 muestra los requisitos de las propiedades de consenso.

Tabla 4.8 Requisitos de propiedades de consenso del agregado

Millones de ESALs ⁽¹⁾	Angularidad del agregado grueso		Angularidad del agregado fino		Equivalente de arena	Partículas planas y alargadas
	Porcentaje mínimo	Porcentaje mínimo	Porcentaje mínimo	Porcentaje mínimo		
	Distancia desde la superficie <100mm	Distancia desde la superficie >100mm	Distancia desde la superficie <100mm	Distancia desde la superficie >100mm	Porcentaje mínimo	Porcentaje máximo ⁽³⁾
<0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3<3	75/-	50/-	40	40	45	
3<10	85/80 ⁽²⁾	60/-	45	40	45	10
10<30	95/90	80/75	45	40	45	
≥30	100/100	100/100	45	45	50	

Notas: ⁽¹⁾ Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado en el carril de diseño para un periodo de 20 años. Independientemente de la vida de diseño actual de la carretera, determine los ESALs de diseño para 20 años y selecciona el nivel $N_{años}$ apropiado.

⁽²⁾ 85/80 indica que es el 85% del agregado grueso tiene una o más caras fracturadas, y 80% tiene dos o más caras fracturadas.

⁽³⁾ criterio basado en una relación máxima a mínima de 5:1

Fuente: (C-SHRP, 1999)

En lo que respecta a las propiedades de origen no se establecen valores críticos, pues dichos valores son específicos de cada fuente de origen, los valores específicos son establecidos por las agencias locales. Sin embargo, se recomiendan valores para estas propiedades, los cuales se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Valores recomendados para las propiedades de origen

Desgastes de los Ángeles porcentaje máximo	Sanidad del agregado por el uso de sulfato de sodio o de magnesio Porcentaje máximo	Lentes de arcilla y partículas friables en agregado Porcentaje máximo
35-45	10-20 ⁽¹⁾	0,2-10 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Para cinco ciclos⁽²⁾ Dependiendo de la composición exacta del contaminante

Fuente: (Asphalt Institute SP-2, 1992)

Requisitos del cemento asfáltico

La metodología SUPERPAVE establece una nueva especificación para los cementos asfálticos con un nuevo conjunto de ensayos.

Estas nuevas especificaciones se basan en el desempeño del pavimento. El cemento asfáltico se especifica conforme a las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación. Las propiedades físicas exigidas se mantienen sin cambios; sin embargo varía la temperatura para la cual el cemento asfáltico debe cumplir esas propiedades. El cemento asfáltico se clasifica en grados de desempeño (PG), y temperaturas de servicio. El grado PG permite elegir el cemento asfáltico más adecuado para determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil. Por ejemplo, un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64°C, y tan bajas como -22°C.

Los grados PG recomendados para el caso de México son PG 64-22; PG 70-22; y PG 76-22, dependiendo de la zona geográfica donde se pretenda utilizar (SCT, 2005).

Otro aspecto clave en el sistema SUPERPAVE es que el comportamiento viscoelástico del asfalto se considera en sus especificaciones. La especificación $G^*/\sin d$ representa una medida de la rigidez del asfalto a altas temperaturas, a la resistencia a las deformaciones

permanentes; esta especificación se determina en el asfalto original; y la G^*_{send} representa una medida de la resistencia al agrietamiento por fatiga; esta especificación se determina en el asfalto envejecido para simular las condiciones de envejecimiento en un pavimento en servicio (Asphalt Institute SP-1, 1996).

Requisitos de la granulometría

Para especificar la granulometría, con la metodología SUPERPAVE se emplea una curva granulométrica (llamada gráfica de Fuller), en la que la abertura de las mallas se eleva a la potencia (0,45), para definir la granulometría permitida de la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados.

Una característica importante de esta curva es la granulometría de máxima densidad, la cual representa la gradación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. La línea de máxima densidad se determina graficando una línea que une el origen con el punto donde el tamaño máximo de la malla intersecta la línea que corresponde al porcentaje que pasa el 100%.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control, y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica, y corresponden al tamaño mm).

La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4,75, 2,36 mm, y 0,3 mm). Forma una banda por la cual la curva granulométrica no debe pasar.

Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con buena resistencia al corte. La Figura 4.1 muestra la curva de máxima densidad, los puntos de control, y la zona restringida para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

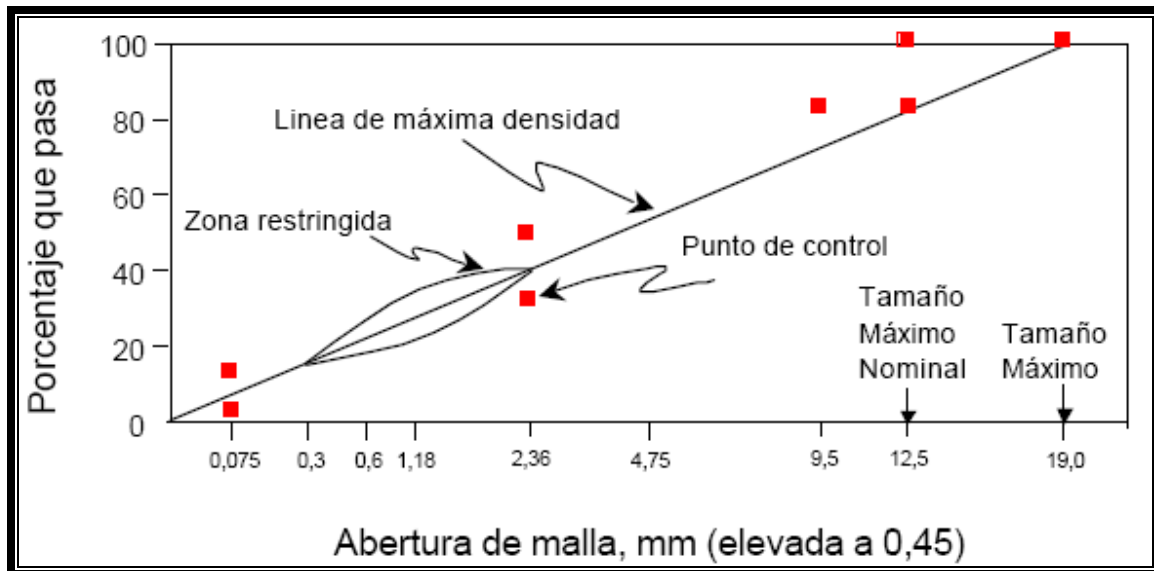


Figura 4.1. Curva de máxima densidad y límites para la granulometría con un tamaño máximo de agregado de 19 mm

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requisitos granulométricos del método SUPERPAVE.

Los valores de los puntos de control y de la zona restringida están referenciados a cinco designaciones que la metodología SUPERPAVE establece; en las cuales se proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a dichos puntos (Asphalt Institute SP-2,1996). En la Tabla 4.10 se presentan las cinco designaciones propuestas en la metodología SUPERPAVE.

Tabla 4.10 Designaciones de las mezclas SUPERPAVE

Designación SUPERPAVE	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Requisitos de compactación

Una de las principales diferencias que distinguen al método SUPERPAVE del Marshall, es la forma de compactación en laboratorio de los especímenes; la tecnología tradicional emplea el martillo Marshall, mientras que el SUPERPAVE emplea el compactador giratorio, el cual compacta los especímenes mediante un proceso de amasado, que es más representativo de las condiciones de campo.

Los parámetros del compactador giratorio integran la Tabla 4.11. Los especímenes de prueba son compactados al número de giros de diseño ($N_{\text{diseño}}$) seleccionado. La selección del número de giros se define en función del número de ejes equivalentes (ESAL) del proyecto. En la Tabla 4.12 se presentan los diferentes rangos de valores establecidos para el número de giros.

Adicionalmente, se deben compactar especímenes al número máximo de giros ($N_{\text{máxima}}$) para verificar el porcentaje de G_{mm} de la mezcla compactada (Tabla 4.13).

Tabla 4.11 Especificaciones del compactador giratorio SUPERPAVE

Parámetro	Valor
Esfuerzo vertical	600 kPa
Angulo de giro	1,25 °
Velocidad de giro	30 rpm

Tabla 4.12
Especificaciones de la compactación giratoria SUPERPAVE

ESAL de diseño, millones	Parámetros de compactación		
	N _{inicial}	N _{diseño}	N _{máxima}
<0,3	6	50	75
0,3 <3	7	75	115
3<30	8	100	160
≥30	9	125	205

El número de giros inicial (N_{inicial}) representa el acomodo de la mezcla durante la compactación; el número de giros de diseño (N_{diseño}), la compactación de campo y el número máximo de giros (N_{máximo}), la compactación alcanzada por la mezcla al final de la vida útil del pavimento.

Otros requisitos concernientes a la compactación de los especímenes, son las temperaturas de mezclado y compactación. Para definir dichas temperaturas se requiere medir la viscosidad rotacional del asfalto para al menos dos temperaturas. El SUPERPAVE especifica realizar ensayos de viscosidad rotacional a 135 y 165 °C, aunque pueden hacerse mediciones adicionales a otras temperaturas. Los valores de los rangos de viscosidades permanecen iguales a los señalados para otros métodos de diseño, pero con unidades diferentes. El rango para la temperatura de mezclado es de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s; y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para la temperatura de compactación (Asphalt Institute SP-2, 1996).

Requisitos volumétricos

Los valores mínimos especificados en el SUPERPAVE para los parámetros volumétricos de la mezcla se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13
Requisitos volumétricos del diseño de mezclas SUPERPAVE

ESAL de diseño (millones)	Densidad requerida (porcentaje de G_{mm})			VMA Porcentaje mínimo					VFA Porcentaje mínimo
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máxima}$	Tamaño nominal máximo (mm)					
				37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	
<0,3	≤ 91,5	96,0	< 98,0	11,0 ⁽⁴⁾	12,0	13,0	14,0	15,0	70-80 ⁽²⁾
0.3<3	≤ 90,5								65-75 ⁽²⁾
3<10									65-75 ⁽³⁾
10<30	≤ 89,0								
≥30									

(1) Los ESAL de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado, para un periodo de diseño de 20 años.

(2) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 9,5 mm, el rango de VFA especificado debe ser de 73% a 76% para los niveles de tránsito de diseño ≥ 3 millones de ESALs

(3) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 25 mm, los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 66% para niveles de tránsito de diseño < 3 millones de ESALs

(4) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 37,5 mm los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 63% para todos los niveles de tránsito de diseño.

Fuente: (C-SHRP, 1999)

Conviene señalar que en investigaciones recientes realizadas por Christensen (Christensen, et al, 2004) para el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) de los Estados Unidos, se recomienda que los valores mínimos de VMA de las mezclas diseñadas de acuerdo con el sistema SUPERPAVE se incrementen en 1 % para asegurar una adecuada resistencia a la fatiga.

Requisitos de la proporción de polvo y susceptibilidad a la humedad

Otros requisitos del SUPERPAVE son la proporción de polvo en la mezcla y la susceptibilidad a la humedad.

La proporción de polvo se calcula dividiendo el porcentaje en peso del agregado más fino que la malla de 0,075 mm, entre el contenido de asfalto efectivo con respecto a la masa total de la mezcla. La relación de polvo-asfalto debe estar entre 0,6 y 1,6 (C SHRP, 1999).

La susceptibilidad a la humedad se evalúa mediante el ensayo de resistencia a la tensión indirecta en especímenes en condición seca y húmeda; el valor mínimo requerido de relación de resistencia a la tensión (TSR) es de 0,80 (Asphalt Institute SP-2, 1996) para especímenes compactados en laboratorio.

Ensayos de comportamiento

Otra de las diferencias importantes de la metodología SUPERPAVE con respecto a otras tecnologías de diseño es que establece ensayos de comportamiento de la mezcla asfáltica compactada, con el fin de evaluar su desempeño a largo plazo.

La ejecución de ensayos depende de los niveles de tránsito. Para niveles de tránsito bajo ($ESAL's < 10^6$) no se requieren ensayos de comportamiento, mientras que para niveles de tránsito intermedio ($10^6 < ESAL's \leq 10^7$) y alto ($ESAL's > 10^7$), es necesario aplicar pruebas de comportamiento.

Los ensayos de comportamiento establecidos en el SUPERPAVE para evaluar la deformación permanente son: el ensayo de deformación específica uniaxial, corte repetido a altura constante; corte simple a altura constante; corte repetido a una relación de tensiones constante; y barrido de frecuencias a altura constante. Mientras que el ensayo para evaluar el fisuramiento por fatiga y por baja temperatura, es el ensayo de tensión indirecta.

Conviene señalar que los ensayos para evaluar el comportamiento a la deformación permanente establecidos en el SUPERPAVE no han sido implementados en su totalidad en los Estados Unidos, ya que son complejos de realizar. A la fecha se continúa investigando para encontrar un ensayo de comportamiento sencillo y fácil de llevar a cabo.

Capítulo 5

DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

5.1 Definición de deformación plástica.

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas. Para esto se necesita que la mezcla esté elaborada con un cemento asfáltico consistente, lo más próximo posible a un sólido elástico también a temperaturas relativamente altas.

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de cemento asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla.

La temperatura funcional del asfalto es de gran importancia, así como los gradientes de temperatura que en ocasiones pueden ser cambiados debido a la conductividad térmica de la mezcla, así como la brillantez o la reflectividad, por medio de la selección del agregado, lo que afecta a la deformabilidad de los pavimentos. La distribución lateral de la zona de rodadas está influenciada por la velocidad del tráfico, el ancho del carril y la profundidad de las roderas. Las velocidades bajas del tráfico, corresponden a frecuencias de carga más bajas, algo que contribuye directamente al desarrollo de roderas en las capas asfálticas.

La acumulación de deformaciones plásticas en una capa de concreto asfáltico pueden ser causadas por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico.

5.2 Tipos de Deformaciones Plásticas (Roderas).

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente, porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irre recuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. Existen dos principales tipos de roderas: roderas por fallas en la subrasante y roderas por fallas en la capa de asfalto, ésta última, de gran interés, debido a que representa el tema principal de este trabajo.

Las deformaciones permanentes se pueden apreciar visiblemente como depresiones o canales a lo largo de la trayectoria por donde ruedan los vehículos en el pavimento. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de roderas, potencialmente contribuye en menos de 5mm, en la profundidad de la rodera. Otras causas que influyen en la producción de hundimientos en los pavimentos asfálticos son los espesores delgados de pavimento, pérdida de material en la superficie por donde ruedan los vehículos y deformaciones plásticas en la capa de asfalto.

5.2.1 Roderas por fallas en la subrasante.

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza en el pavimento o dureza para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable. También puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.

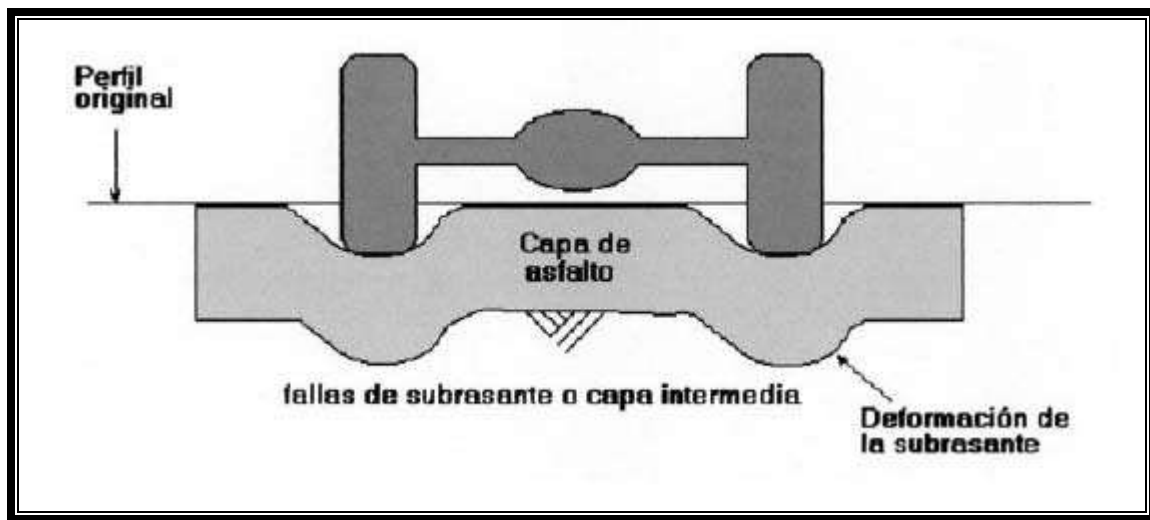


Figura 5.1 Roderas por fallas en la subrasante.

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados. Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm. hasta los 1000 mm., con poca profundidad y formas curveadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es lo suficientemente rígida a la deformación, ocurrirán fisuras por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la trayectoria de la llanta.

Algunas veces atravesando toda la sección del pavimento, parecería un tipo de falla por punzonamiento, con piezas quebradas empujadas hacia abajo.

Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

5.2.2 Roderas por fallas en la capa de asfalto.

Es el tipo de roderas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas, una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial de asfalto o debido a debilitamiento en las capas inferiores de asfalto.

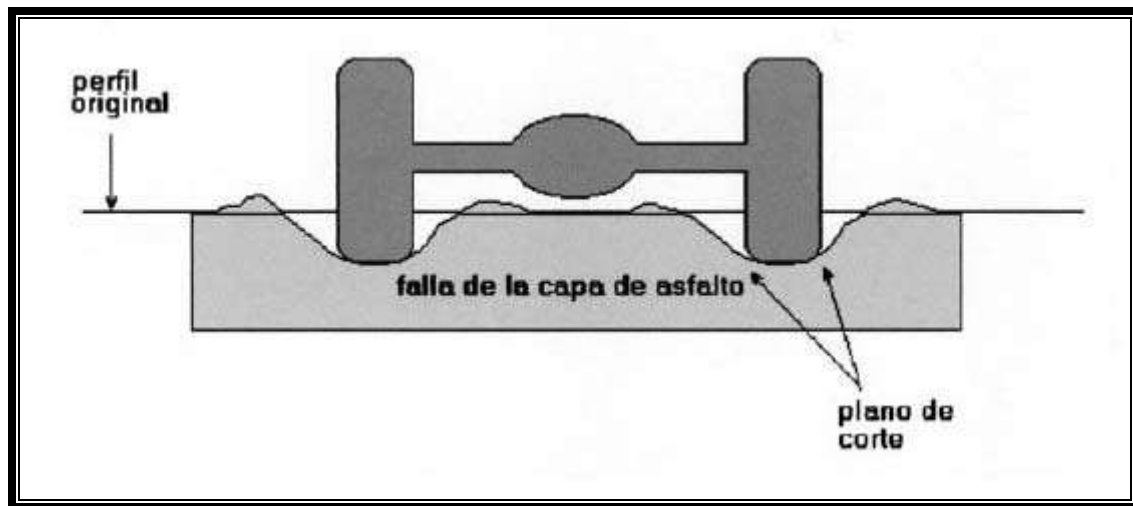


Figura 5.2 Roderas por fallas en la mezcla asfáltica.

Las roderas en una mezcla débil ocurren típicamente durante el verano, cuando el pavimento se encuentra sometido a temperaturas altas, esto podría sugerir que las roderas son causadas por el sol, pero es más correcto pensar, que es una combinación de la resistencia de los agregados pétreos y el cemento asfáltico empleado.

Las roderas como se ha dicho antes son la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes y una manera de incrementar la fuerza contra el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Así cuando se aplique la carga el material podrá deformarse y volver a su posición original. Otra manera de prevenir los desplazamientos es seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna, que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y pueda desarrollar un grado de contacto partícula a partícula. Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran unidas de tal manera que fungen como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumula una deformación permanente.

5.3 Mecanismos de formación de roderas.

Cuando las roderas son causadas por deformaciones en la mezcla asfáltica, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, y la rodera se forma por depresión en el área de carga por donde rueda el neumático o los neumáticos, dejando crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. La superficie dentro de la trayectoria del neumático usualmente está lisa y rica en asfalto. El fondo de la rodera tal vez sea lisa y en forma de cuchara. Muchas veces una o más pequeñas crestas existen de la rodera entre los espacios de las llantas duales. Las roderas formadas por deformación tienden a cambiar gradualmente a lo largo de la carretera, por lo tanto el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de tener roderas.

La aparición de roderas como ya se mencionó es causada por la falta de resistencia ante las cargas generadas en la mezcla asfáltica, por la aplicación de cargas verticales en la superficie. En ocasiones la falta de resistencia puede ser causada por el desequilibrio entre el asfalto y la mezcla. Dicho desequilibrio puede ser causado por daños por humedad en la mezcla o debilitamiento del esqueleto mineral. Las roderas en los materiales del pavimento se desarrollan gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga.

La importancia de utilizar materiales para la superficie de los pavimentos, con alta densidad, pueden minimizar el orden de magnitud de las deformaciones permanentes. Se ha mencionado en estudios de investigación que las roderas mayormente son causadas por flujos de deformación acompañadas de cambios de volumen en los materiales

A continuación se ilustra el efecto sobre una superficie de pavimento debido al número de pasadas de neumáticos en un ensayo de pista. Estos datos permiten hacer mediciones del promedio de la profundidad de la rodera como el volumen de material desplazado por debajo de las llantas y por encima de las zonas adyacentes a ellas. Con esta información, a través de la figura se pueden obtener dos conclusiones:

1. En el escenario inicial de tráfico, el incremento de las deformaciones irreversibles por debajo de los neumáticos es particularmente mayor que el incremento en las zonas por encima de la superficie. En esta fase inicial, la compactación debida al tráfico, tiene una mayor influencia en las roderas.
2. Después del escenario inicial, el volumen que disminuye por debajo de las llantas es aproximadamente igual que el volumen que se incrementa por los bordes en la parte superior del pavimento. Esto es un indicador de que mayormente la compactación se lleva a cabo bajo las sollicitaciones del tráfico y de que las roderas son causadas primordialmente por desplazamiento con volumen constante. Esta fase se consideró en gran parte para representar el comportamiento de la deformación en el tiempo de vida del pavimento.

Hofstra y Klomp (1972) encontraron que la deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas de niveles inferiores.

Las roderas son causadas básicamente por flujo plástico, a mayor profundidad de la mezcla, existe una mayor resistencia al flujo plástico y también a mayor profundidad se reducen los niveles de tensión. La deformación plástica en una capa de pavimento, puede verse incrementada en la medida en que dicha capa es de menor espesor.

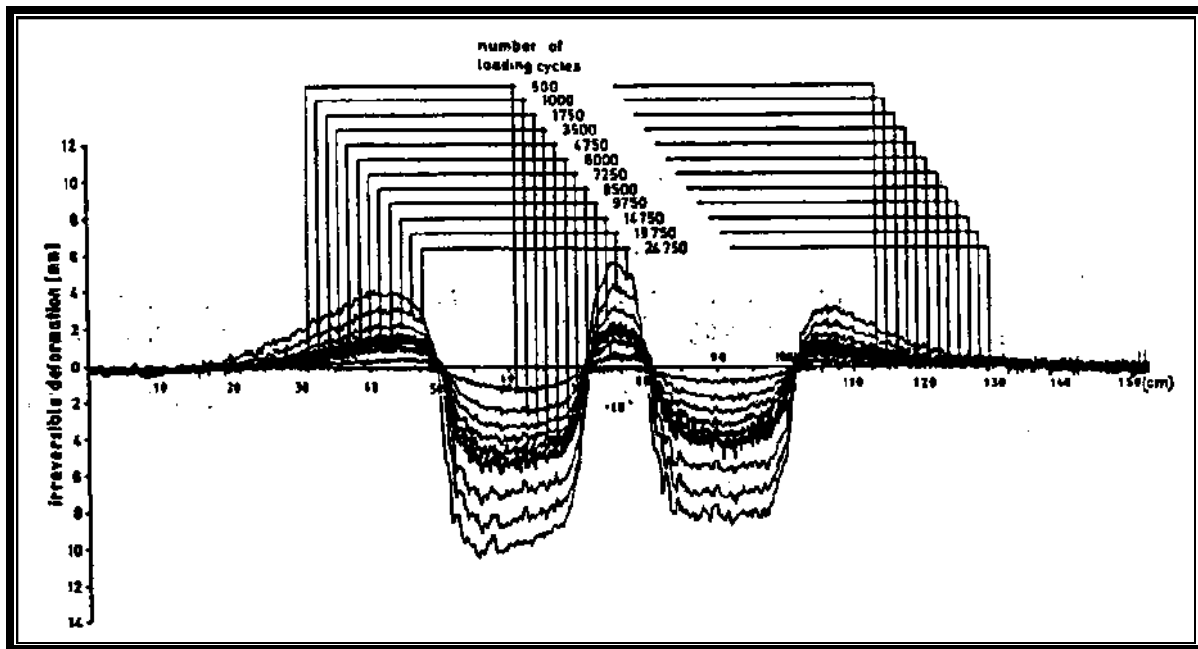


Figura 5.3 Mecanismo de acumulación de deformaciones irreversibles en la mezcla asfáltica. HOFSTRA, A., and A.J.G. KLOMP (1972).

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, que son los que deben soportar las cargas del tráfico y un cemento asfáltico de naturaleza viscoelástica, que actúa como pegamento manteniendo unido el esqueleto mineral.

El cemento asfáltico no puede resistir las cargas del tráfico, pues debido a su naturaleza viscosa- elástica puede fluir en función de la carga y su tiempo de aplicación, sin embargo el cemento debe tener la suficiente cohesión para prevenir el desprendimiento de partículas y para resistir los esfuerzos de corte que se generan en los puntos de contacto entre agregados y que superan la fricción entre los mismos. Si el cemento no es capaz de sujetar las partículas en su sitio, estas pueden moverse compactando el esqueleto a una configuración más densa.

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la

temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

- En Invierno, cuando las temperaturas son bajas, no existen deformaciones plásticas, porque la mezcla se comporta de manera elástica.
- En Otoño y Primavera, cuando hay regularmente temperaturas intermedias, la mezcla tiene gran parte de su comportamiento elástico y las deformaciones plásticas son mínimas.
- En Verano, a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan. Parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes o roderas.

A continuación se muestra en la siguiente figura el cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura de servicio.

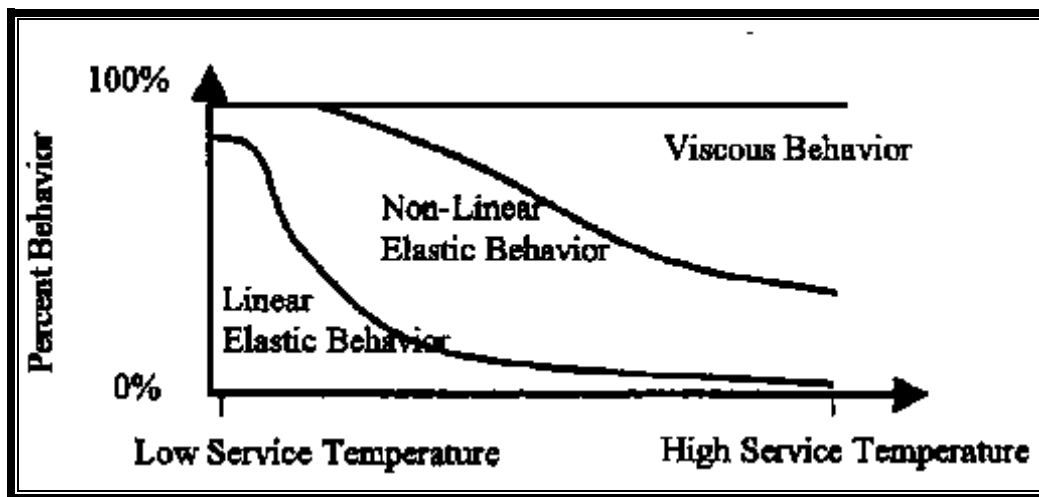


Figura 5.4 Cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura.
GERALD A. HUBER. (1999).

Normalmente la magnitud de las deformaciones permanentes es baja y no supone ningún problema, sin embargo si las deformaciones son muy altas o la mezcla tiene un

comportamiento predominantemente viscoso las deformaciones permanentes pueden ser muy significativas.

5.3.1 Solicitaciones de cargas a un pavimento.

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).
- Forma geométrica de cada solicitud sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitud en un punto.
- Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc.
- Características de las capas del pavimento.

Las cargas de los vehículos al pavimento se transmiten a través de las ruedas, en los métodos de diseño mecanicistas es necesario conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento, asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se indica en la Figura.5, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la misma está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión de la llanta, deben

ser iguales a la fuerza debido a la presión de contacto; la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, en el diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto, es estar por el lado de la seguridad. (Huang, 1993).

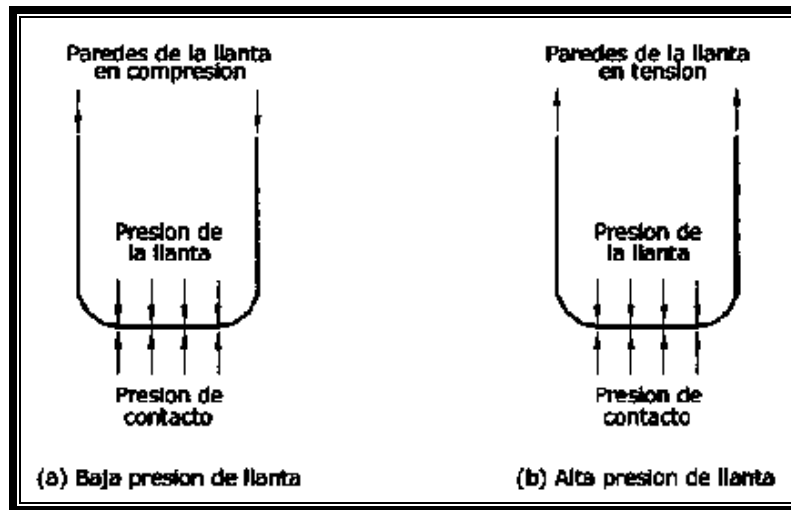


Figura 5.5 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta.

Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular, esta suposición es incorrecta, pero el error en el que se incurre no es significativo.

Otro aspecto que tenemos que considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría viscoelástica para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo. (Huang, 1993).

5.4 Factores intervienen en la formación de roderas.

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las roderas o deformaciones plásticas permanentes de los pavimentos, los cuales se describirán a continuación. Cabe mencionar que se deben tener muy en cuenta estos factores al momento de realizar el proyecto de las mezclas asfálticas y la construcción de los pavimentos flexibles.

Granulometría de los agregados pétreos.

Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de las roderas.

Cuando las mezclas asfálticas densas o de granulometrías continuas, se compactan propiamente se logran mezclas con menor porcentaje de vacíos y con mayores puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta. Brown y Pell (1974) concluyeron que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las roderas a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

Harvey y Monismith (1993) analizaron el efecto de los tipos de agregado sobre la generación de deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Para dicho estudio se utilizaron dos tipos de agregados: granulometría con bajo contenido de finos (2.5%) y granulometría con contenido normal de finos (5.5%). La granulometría con contenido normal de finos tiene un tamaño máximo de agregados de 1". La granulometría con bajo contenido de finos es esencialmente la misma, con la variación del 3% en el contenido de finos. El efecto significativo en la deformación cortante permanente generado por la reducción en el contenido de finos en un 3% resultó sorprendente. Para el contenido bajo de finos se obtuvo un número de repeticiones promedio de 66,476, mientras que para el contenido normal de finos se presentó un valor promedio de 13,886, con lo que existe una diferencia del 131%.

Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos.

Para una buena resistencia a las roderas, la textura de la superficie del agregado juega un papel extremadamente importante. Particularmente en espesores gruesos de capas de asfalto y en climas calientes o en donde se requiera textura superficial rugosa. La forma de la partícula es muy importante.

Uge y Van de Loo (1974) concluyeron que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares son menos susceptibles a las deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas elaboradas con materiales con caras lisas o de canto rodado procedentes de río, sin triturar.

En este estudio el efecto de la trituración en la textura superficial no fue definido, debido a que es muy difícil separar los efectos de la textura superficial y los de la forma, debido a las caras de fractura.

Monismith et al. (1994) señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia a las roderas. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de roderas. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.

El esqueleto mineral contribuye a la componente elástica del material; su forma y textura influye en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico.

Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla.

El polvo mineral junto con el cemento asfáltico forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico,

impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mastico son diversos:

- a) La relación Polvo Mineral / Asfalto de manera que cuanto más alta es ésta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La Finura del Polvo Mineral y su afinidad por el agua. Estos dos factores están relacionados en muchos casos, pero también pueden ser bastante independientes. Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión –compresión. Con éste ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos.

El Polvo Mineral o Filler forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, además cumple con las siguientes funciones:

- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto. Sustituye parte del asfalto o betún que de otra manera sería necesario para conseguir unos huecos en mezcla suficientemente bajos.
- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los áridos más gruesos.
- Hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación.

Las especificaciones suelen dar recomendaciones sobre si el polvo mineral de las mezclas asfálticas puede ser el propio de los agregados si es una calidad adecuada y suficiente a la

requerida o debe ser necesariamente, en todo o en parte, de aportación; en cualquier caso, sea cual sea, debe tratarse de un material no plástico.

En otras unidades de obra diferentes de las mezclas, esta fracción no se suele considerar separadamente del resto del árido fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza.

Tipo de Cemento Asfáltico.

Cuando los cementos asfálticos son poco viscosos, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de pavimentos. (Monismith et al., 1985).

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del cemento asfáltico que se le añada a la mezcla aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los cementos asfálticos convencionales a la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se incluyen asfaltos modificados. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas. La componente elástica del cemento asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el cemento influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente.

Corté et al. (1994) realizaron una serie de pruebas en la pista circular del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC), en Francia, con el fin de determinar el efecto del tipo de asfalto en la formación de roderas, y para esto utilizaron tres tipos de asfalto, un convencional 60/70, un asfalto modificado con polímeros SBS y un asfalto multigrado Shell, también utilizaron una capa muy delgada de asfalto sobre un material de módulo alto (asfalto duro de grado 10/20). Los resultados mostraron que los asfaltos modificados con polímeros, multigrados y duros, mejoran la resistencia a las deformaciones plásticas.

Contenido de Cemento Asfáltico.

El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.

Mahboub y Little (1988) indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el cemento asfáltico. Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.

Contenido de Vacíos en el Agregado Mineral.

Cooper, Brown and Pooley (1985) concluyeron que la buena resistencia a la deformación plástica de las mezclas requieren bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM) y que la granulometría deseada para mínimos contenidos de VAM puede ser determinada usando ensayos a agregados secos. Sin embargo se debe tener precaución que contenga la

mezcla el mínimo contenido de vacíos teórico en el agregado mineral. Pudiera ser no deseable que no hubiera suficientes vacíos en el agregado mineral, con esto se asegura que la cantidad de cemento asfáltico sea satisfactoria.

Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de roderas en las mezclas asfálticas, Utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contienen distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos con el espesor de la capa de mezcla asfáltica causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño.

Contenido de Vacíos en la Mezcla Asfáltica.

Se ha mencionado que reduciendo en un cierto valor limitado el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica, se incrementa la resistencia ante las roderas. En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica. Se realizaron diversas pruebas de compresión axial con fluencia, y aunque las mezclas se comportaban de manera distinta significativamente, su módulo instantáneo era muy similar. Por último, las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas con altos contenidos de vacíos.

Se tiene que mencionar que la compactación es un factor crítico en la preparación de especímenes para evaluación en el laboratorio. Se debe tratar de simular y reproducir en la medida de lo posible, la compactación que se lleva a cabo en campo en condiciones reales.

En los casos el diseño de mezclas se deben incluir parámetros sobre los porcentajes mínimos y máximos aceptables referentes al contenido de vacíos tanto en la mezcla como en el agregado mineral para poder garantizar un funcionamiento adecuado del pavimento durante el periodo de servicio.

Cargas de los vehículos y Presión de contacto de los neumáticos con el pavimento.

Las cargas de los vehículos se transmiten al pavimento por medio de los neumáticos, el área de contacto es muy importante, la presión de contacto, depende de la presión de inflado de los neumáticos, como se ha dicho, la presión de contacto es más grande que la presión de la llanta, para presiones bajas de la llanta y la presión de contacto es más pequeña que la presión de la llanta, para presiones altas de las llantas. Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, lo que conlleva a la formación de roderas son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

Monosmith et al (1994) realizaron un proyecto con el Strategic Highway Research Program (SHRP) en donde analizaron el efecto del estado de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones plásticas. Durante una serie de ensayos que tenía como fin observar el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo distintas condiciones, esto es, utilizando dos niveles de esfuerzo, uno alto y otro bajo, al final se determinó que un incremento en la presión de contacto de los neumáticos con el pavimento produce un decremento en la resistencia de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas.

Número de Repeticiones de carga.

Monosmith et al (1994) observaron que un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas, es decir, cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento, se puede considerar como un pulso de carga, si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esta condición le permite comportarse de una manera viscoelastoplástica ante las solicitaciones del tráfico, cada pulso de carga, se irá acumulando permanentemente lo que generará las roderas.

Empleo de modificadores asfálticos.

El empleo de modificadores asfálticos, favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de roderas.

Stuart (1993) analizó el efecto que presenta la utilización de modificadores sobre las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas. Realizó una comparación entre las propiedades de una mezcla que contenía asfalto AC-20 y otros asfaltos que contenían diferentes tipos de modificadores. La información obtenida sobre viscosidad y penetración de los cementos indican que los tres modificadores químicos pueden ser más rígidos para temperaturas altas en el pavimento y más suaves para temperaturas más bajas que para el caso de los pavimentos que no incluyen modificadores asfálticos. Las deformaciones permanentes fueron medidas mediante pruebas de fluencia utilizadas para evaluar la susceptibilidad de las mezclas a las roderas. Los tres modificadores químicos presentaron resultados mostrando un decremento en las deformaciones con un promedio de 25%.

Kamel y Miller (1994) realizaron un estudio para observar el efecto de los modificadores sobre las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Emplearon tres tipos de asfaltos: uno convencional, uno modificado con polímeros, y un asfalto modificado sin el uso de polímeros llamado Premium. En términos de comportamiento, los asfaltos modificados mostraron una mayor resistencia a las roderas comparado con los valores obtenidos para un asfalto convencional. Al inicio de las pruebas, el comportamiento de los tres pavimentos fue excelente, empezando a observarse diferencias en el comportamiento

con el cambio de ciclos de carga de 10,000 a 20,000 cuando el pavimento convencional empezó a mostrar deterioros en una forma acelerada. A medida que se aplicaron más cargas, el comportamiento de las mezclas modificadas con asfaltos fue notoriamente superior, y ambas mezclas modificadas tuvieron un comportamiento muy similar durante toda la prueba. Debido a las deformaciones excesivas presentadas en el pavimento convencional, la prueba se terminó después de los 300,000 ciclos de carga. Las pruebas para los otros tipos de pavimentos (modificados) duraron hasta los 900,000 ciclos de carga. Se comparó el número de ciclos necesarios para causar una deformación permanente de 26 mm., en cada uno de los tres pavimentos y resultó muy evidente que los pavimentos modificados incrementaron significativamente la capacidad de carga de las secciones analizadas.

Monismith et al. (1994) comentaron que los modificadores pueden ser utilizados para incrementar la rigidez de las mezclas asfálticas a temperaturas críticas, reduciendo la susceptibilidad ante la formación de roderas. Asimismo, investigaron la influencia de los modificadores sobre las características de deformación plástica de mezclas definidas por la prueba de cortante simple con carga repetida.

Temperatura medioambiental.

Es conocido el hecho de que la temperatura medioambiental elevada, reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

La temperatura medioambiental por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos, porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica. Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de roderas.

Agua.

El agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

Terrel et al. (1993) realizaron un estudio en la Universidad del Estado de Oregon en E.U.A., donde se demuestra que la propensión a las roderas de las mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua. El incremento en las roderas que podrían ocurrir in situ pueden ser estimadas utilizando el procedimiento presentado por el programa SHRP.

Capítulo 6

DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA.

Como ya se ha mencionado, para el presente trabajo, la evaluación se basa directamente en la Normativa española debido a que en nuestro país aún no se tienen estos parámetros normados, la norma que describe la prueba es la; (NLT-173/00) “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”.

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla bituminosa, tanto en el caso de proyecto de mezclas en el laboratorio como en el de testigos procedentes de firmes.

El ensayo consiste en someter una probeta de mezcla bituminosa, al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

Este procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tráfico y clima, aunque variando las condiciones del ensayo puede también ser de utilidad en otros tipos de mezclas.

En los últimos tiempos se han venido haciendo una serie de este tipo estudios de comportamiento a las deformaciones plásticas en diferentes partes del mundo, principalmente en Europa, y por tal motivo se han creado una gama de quipos para este tipo de ensayos.

6.1. Equipos para Ensayos de Rueda cargada o Wheel-Tracking Tests.

Los ensayos de rueda cargada se encuentran dentro de los ensayos de simulación. Para alcanzar una validación correcta entre lo que sucede en laboratorios e in situ, el ensayo debe reproducir las condiciones de tensiones que se desarrollan dentro del pavimento y para un rango de temperaturas amplio que permita abarcar condiciones desfavorables del orden de los 60°C.

El procedimiento general de ensayo consiste en medir la velocidad de deformación o la deformación vertical que se produce en un espécimen de mezcla asfáltica, prismático o cilíndrico, ante la aplicación de una carga dinámica, aplicada mediante una rueda cargada.

Las características de los equipos difieren de acuerdo a su origen. A continuación se presentan algunos de los equipos Wheel-tracking test más difundidos.

Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)

El modelo de Hamburgo fue desarrollado en Alemania en 1970, tomando como idea principal un modelo de origen Británico. Es ampliamente utilizado en EE. UU. Y Europa para evaluar mezclas asfálticas en relación a su resistencia a la humedad y al ahuellamiento.

En EEUU está normalizado en AASHTO T 324-04 Standard Method of test of Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt. En general, permite evaluar dos muestras simultáneamente, mediante dos ruedas paralelas.

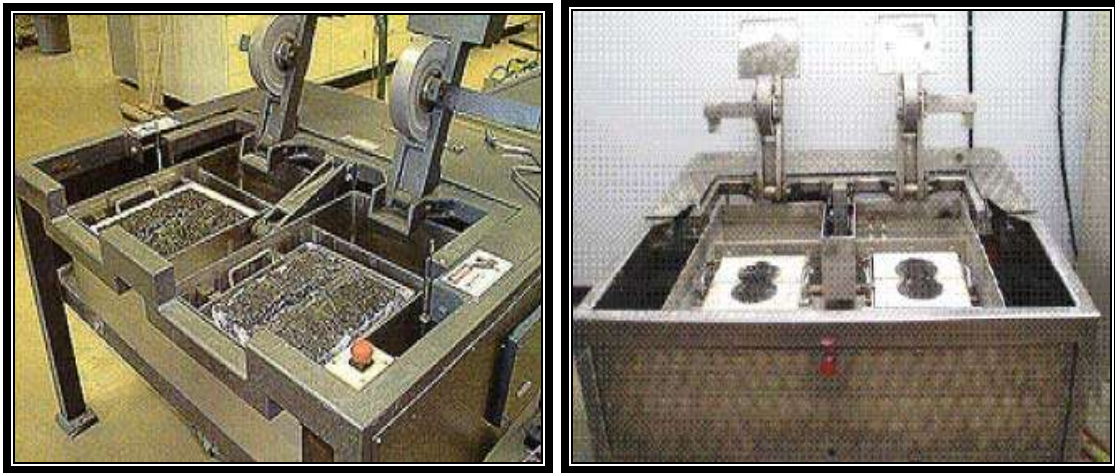


Figura 6.1 Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTd)

Cada mitad del sistema esta compuesta por una rueda de acero de 4.7cm de ancho y 20.36cm de diámetro que se mueve hacia delante y hacia atrás, a una velocidad aproximada de 34 cm/seg (53 ± 2 pasadas/min), aplicando una carga de 705N sobre una muestra sumergida en agua a una temperatura que oscila entre los 25°C Y 70°C, siendo 50°C la temperatura mayormente empleada. Dichas muestras pueden ser prismáticas (26cm x 32cm x 4cm, con un contenido de vacíos de 6% a 8% para mezclas densamente graduadas y 5% a 6% para mezclas tipo S.M.A, compactadas por amasado) o cilíndricas (de 15.2cm o 25.4cm de diámetro, 6.2cm de espesor y densidad del 93%).

El ensayo se realiza hasta un número determinado de pasadas o hasta una deformación propuesta, lo que ocurra primero. Una vez finalizado el mismo se grafican los resultados en una curva de deformación en función del número de pasadas, y a partir de esta se determinan los parámetros de evaluación: máximo ahuellamiento, pendiente de deformación o “creep slope” (susceptibilidad al ahuellamiento), pendiente de descubrimiento o stripping slope (deformación acumulada causada por daños de humedad) y punto de descubrimiento o “stripping point” (punto donde comienzan a notarse los cambios por humedad).

Existen otros ensayos derivados del de Hamburgo, como el SCRT o el ERSA, en donde se introducen pequeñas modificaciones en las distintas variables del ensayo (carga aplicada y velocidad de aplicación, tipo de muestra, condición húmeda o seca, contenido de vacíos, temperatura de ensayo), o del instrumental (dimensiones de probetas, aplicación de carga sobre manguera neumática).



Figura 6.2 Máquina de ensayo ERSA

Otro ejemplo a considerar es el modelo realizado en el LEMIT (La Plata Argentina) a partir del Wheel Tracking Test WTT, que había sido construido en 1962 siguiendo la norma británica. El modelo de Hamburgo puede ser empleado para la evaluación de mezclas asfálticas aplicando un criterio de “pasa” / “no pasa” en el diseño de las mismas, así como para la comparación con otros métodos de evaluación.

Georgia Load Wheel Tester (GLWT)

El GLWT fue desarrollado a mediados de los 80 en Georgia a partir de modificaciones introducidas a un modelo diseñado por C.R. Benedict de Benedict Slurry Seals. Inc., para

ensayar lechadas de asfalto (slurry seals) a los fines de elaborar un instrumento que permitiera realizar ensayos de medición de ahuellamiento en laboratorio así como también control de calidad en obra de mezclas asfálticas en caliente.



Figura 6.3 Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT)

Utiliza muestras cilíndricas (de 15 cm de diámetro x 7.5 cm de altura) o una muestra rectangular (12.5 cm de ancho x 30 cm de largo x 7.5 cm de altura) compactadas por distintos métodos y con contenidos de vacíos de 4% o 7%.

La metodología empleada consiste en la aplicación de una carga de 445N a través de una rueda metálica, que apoya sobre una manguera neumática presurizada a 690 kPa, ubicada sobre la muestra, donde a partir de un movimiento de ida y vuelta (1 ciclo) de esta última simula la circulación vehicular, y permite la medición de ahuellamiento, en particular a los 8000 ciclos, para condiciones dadas de temperatura que oscilan entre los 35°C y los 60°C. La velocidad de la rueda es de 55.55 cm/seg (33 ciclos/min), sobre un recorrido de 33 cm.

Asphalt Pavement Analyzer (APA).

El APA fue constituido por primera vez en 1996 por Pavent Technology, Inc a partir de una modificación del modelo de Georgia. Su uso se encuentra protocolizado a través de la norma AASHTO TP 63-03 Standard Test Method for determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures using the Asphalt Pavement Analyzer.

Tiene la capacidad de evaluar ahuellamiento, fatiga y resistencia a la acción de la humedad de mezclas asfálticas en caliente, a través de un dispositivo similar al de Georgia: una muestra cilíndrica o rectangular, sometida a una temperatura entre 40.6°C y 64°C, sobre la que apoya una manguera a una presión de 690 kPa o 830 kPa y una rueda que aporta, mediante un movimiento de ida y vuelta (1 ciclo) sobre la manguera, una carga de 445N o 533N (depende de la presión dada) simulando los vehículos circulantes.

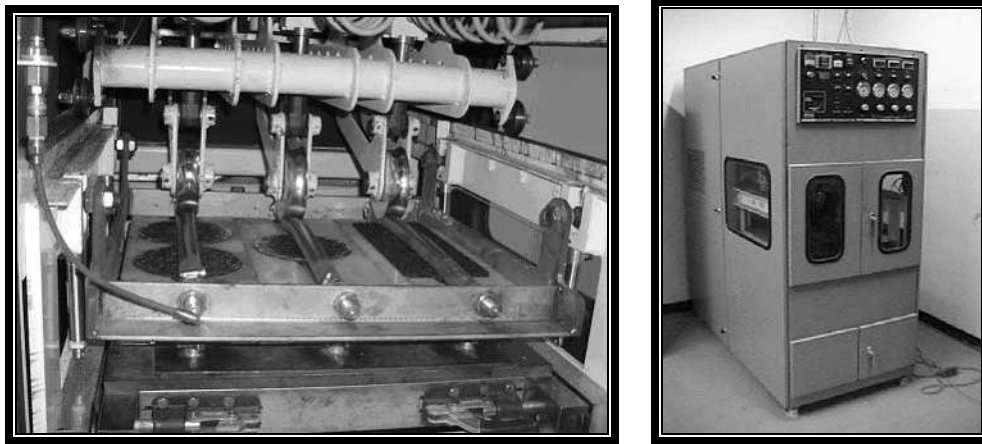


Figura 6.4 Asphalt Pavement Analyzer (APA)

Las muestras se compactan mediante vibrado o amasado logrando 4% o 7% de contenido de vacíos en las cilíndricas y 7% en las rectangulares. Las mismas pueden estar secas o saturadas y realizadas en laboratorio o extraídas in situ.

Los resultados que se obtienen son la deformación al final del ensayo (8000 ciclos) y una grafica deformación vs tiempo.

Equipo de Pista de ensayo de laboratorio según la normativa española e inglesa.

Estos equipos de ensayos permiten determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla bituminosa, tanto en los casos de proyectos de mezclas en el laboratorio como en el de testigos procedentes de pavimentos.

El ensayo consiste en someter una probeta de mezcla bituminosa, al paso alternativo de una rueda metálica de 20cm de diámetro, recubierta con 10 a 20mm de caucho (dureza 80 Shore A), en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Las características particulares de cada uno de los ensayos normalizados se describen en el punto de comparación de normas. Los resultados obtenidos, para una temperatura y una frecuencia de ensayo dada, manifiestan la deformación acumulada en el centro de la probeta, y la velocidad de deformación expresada en mm/min , para diferentes periodos de tiempo.



Figura 6.5 Máquina de ensayo de la Universidad Politécnica de Cataluña . (izquierda) y de Mastrad (derecha)

Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device.

Este ensayo de rueda cargada se desarrollo en la Universidad de Purdue y presenta similitud con el ensayo de Hamburgo, ya que permite determinar el ahuellamiento potencial y sensibilidad a la acción de la humedad. Aplica una presión de 620kPa sobre la muestra (de campo o laboratorio) con una velocidad de 33.2cm/seg a través de una rueda neumática inflada a una presión de 793kPa.

Las dimensiones de la probeta utilizada son de 50cm de longitud, 18cm de ancho y de 1 a 5 cm de espesor. Las muestras son rectangulares (29cm x 31cm) y su espesor es función del

tipo de mezcla que se está ensayando: superficiales 3.8cm; mezclas de base 5.1cm y mezclas asfálticas gruesas para base 7.6cm.

Se compactan por medios de compactación lineales con contenidos de vacíos entre 6% y 8% pudiendo ensayarse en condiciones húmedas o secas.



Figura 6.6 Máquina de ensayo, Purdue University Laboratory Wheel Tracking.

El ensayo se realiza hasta los 20000 pases de ida y vuelta o hasta los 2cm de ahuellamiento. Finalizado, se procede a obtener el coeficiente de humedad definido como la relación entre el número de ciclos para los que se alcanza una huella de 1.27cm en condiciones secas y el correspondiente para condiciones húmedas (el valor 1.27cm define un límite entre buen y mal comportamiento frente a la humedad).

Cabe destacar que en este ensayo puede adaptarse una rueda móvil con la cual simular un movimiento en sentido transversal en el ancho de la muestra.

French Wheel Tracker (FWT).

El FWT es un ensayo que permite prevenir daños por ahuellamiento en mezclas asfálticas en caliente. Con ese objetivo ha sido usado en Francia en los últimos 20 años y en la actualidad ha comenzado a utilizarse en los EE.UU.

La metodología de este aparato es similar a las ya descritas; una carga de 5000N es aplicada a una rueda neumática de 400 x 8 con una presión de inflado de 600kPa, a una velocidad de 194.44 cm/seg (67ciclos/min).

Las dimensiones de la probeta utilizada son de 50cm de longitud, 18cm de ancho y de 1 a 5 cm de espesor. Cabe destacar que esta máquina permite el ensayo de 2 probetas simultáneamente. Las mismas pueden corresponderse con la base o la superficie de rodadura, para lo cual varían las temperaturas de ensayo: 50°C y 60°C, respectivamente.

Finalizando el ensayo se calcula la deformación, definida como la medida de 15 mediciones de profundidad de huella medidas en 5 hileras paralelas al largo y 3 distribuidas a lo largo del ancho la muestra. Se expresa como un porcentaje del espesor original de la muestra.



Figura 6.7 Máquina FWT , interior y detalle de la probeta.

Model Mobile Load Simulator (MMLS3).

El MMLS3, desarrollado en Sudáfrica, es un simulador de carga móvil con una escala 1/3 respecto al real. Se aplica a la evaluación de muestras de mezclas asfálticas en caliente producidas en laboratorio o in situ. Las mismas tienen dimensiones 120cm x 24cm. Son ensayadas húmedas y secas.

Las características del ensayo son similares a las del simulador a escala real, en este caso la carga, aplicada por una única rueda neumática, inflada a una presión de 800KPa que genera una presión de contacto sobre la muestra de 690KPa, es de 2.1KN (aproximadamente 1/9 de la real dada por una doble rueda) y se mueve a una velocidad de 7200pasadas/hora. Las dimensiones de la rueda son 30cm de diámetro y 8cm de ancho. La temperatura aplicada varía según la condición de ensayo: 50°C y 60°C para condición seca y 30°C para condición húmeda. Puede incorporarse una rueda móvil que simule el movimiento transversal de la misma.

Los valores medios en el ensayo son los de profundidad de huella en los perfiles transversales, los cuales se utilizan para determinar el Módulo por Análisis Sísmico de onda de Superficie (Seismic Análisis of Surface Waves moduli), el cual permite evaluar el ahuellamiento o daños producidos por agrupamiento o humedad.

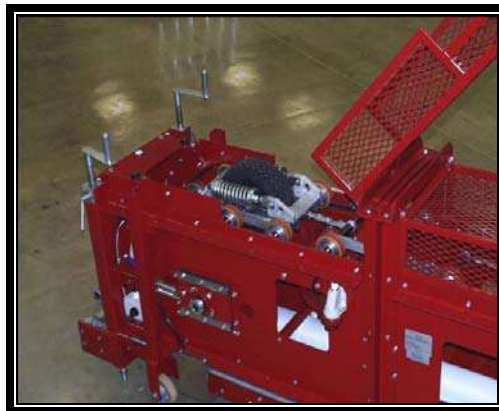


Figura 6.8 Model Mobile Load Simulator (MMLS3)

6.1.1 Comparativa de normas de ensayo.

A continuación se presentan una serie de tablas que comparan las normativas y una serie de normas de ensayo de pista así como los diferentes métodos de compactación (Tablas)

Tabla 6.1

DENOMINACIÓN		Norma Española		Norma Británica		Norma Europea	
OBJETO		NLT-173/84		BS 598 Part 110		BS EN 12697-22:2003	
		Determinación de resistencia a la deformación plástica en una mezcla bituminosa					
TIPO	● Probeta de laboratorio ● Muestra extraída in situ		■ Muestra extraída in situ ● Extensión a laboratorio		● Probeta de laboratorio ● Muestra extraída in situ		
DIMENSIONES [cm] (en planta)	Prismáticas 30 x 30		Cilíndrica Ø 20±0.5		Medida grande (L) (50x18)±0.2	Medida extra grande (XL) (70x50)±0.5	Medida pequeña (S) 26x30 (mínimo) Cilíndrica Ø 30
ESPESOR [cm]	5		Espesor de la capa ±1 cm (hasta 5 cm)		Si espesor capas pavimento ≤ 5cm → 5 > 5cm → 10	6	Igual espesor que en el pavimento o s/ tamaño máximo del agregado (Ver tabla)
Cantidad requerida (por cada variable)	3 (mínimo)		6		Especificar espesor 3 – 5 – 6 – 7.5 – 10		
					Procedimiento A (aire): 6		
					Procedimiento B (aire): 2		
GRADO DE COMPACTACIÓN	Mezcla densa, semi-densa 97% densidad Marshall (mínimo)		6		2 (mínimo)		
	Otras mezclas 95% densidad Marshall				Procedimiento B (agua): 2		
DETERMINACIÓN DE DENSIDAD	Mediante la masa de la muestra y volumen determinado con las dimensiones geométricas de la misma		Cálculo de densidad s/ cláusula 4 de BS 598 Part 104:1989		S/ norma En 12697-33 ó EN 12697-32		

Tabla 6.2

MUESTRA	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA		
			L	XL	S
Acondicionamiento previo al ensayo	Luego de la compactación, se deja enfriar entre 12-24hs (mínimo) y luego se calienta en estufa a 60±2 °C durante 4 horas (mínimo) antes del ensayo	Se colocan las muestras en un ambiente controlado a la temperatura de ensayo durante 4-16hs antes de ensayar, hasta que la probeta alcance la temperatura de ensayo ±1 °C	Condición: • $T_a < 75^{\circ}\text{C}$ si $T_e \leq 60^{\circ}\text{C}$ • $T_a = T_e + 15^{\circ}\text{C}$ si $T_e > 60^{\circ}\text{C}$ Donde: T_a : Temperatura del aire T_e : Temperatura de ensayo Mantener estas condiciones durante 12-16 hs antes de ensayar	Acondicionar las muestras a la temperatura de ensayo por un periodo entre 12-18 hs antes de ensayar	Procedimiento en aire: Función del espesor nominal (NT) NT ≤ 6cm; 4hs (mínimo) NT > 6cm; 6hs (mínimo) 24hs máximo Procedimiento en agua: Colocar en agua a la T_{ensayo} Hacia alcanzarla en +1°C y no menos de 1h
			20		20 – 20.5
			5		5 ± 0.5
			2		2 ± 0.2
RUEDA	Banda de rodadura	80 (Esc Dunlop)	Rueda neumática 400x8	Rueda neumática 6.00 – R9	80(RHD)
					90% acetona 10% kerosene (en volumen)
					(700 w/50 ±10) N
					23 ± 1
PISTA	Carga	900±25 KN/m ² (presión de contacto)			
TEMPERATURA ENSAYO	Recorrido [cm]	23±0.5			
TEMPERATURA ENSAYO	Frecuencia	42±1 pasadas/min			
TEMPERATURA ENSAYO	60±1 °C u otras para estudios especiales	21±0.2 ciclos/min			
TEMPERATURA ENSAYO	45 ó 60 ± 1°C	45 ó 60 ± 1°C			
TEMPERATURA ENSAYO	Variable	Variable			

Tabla 6.3

	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA		
			L	XL	S
DISPOSITIVOS DE CONTROL DE TEMPERATURA	Termosistatos regulables desde el exterior	Termocupla colocado 3 o 4 cm radialmente hacia adentro de la probeta hasta la mitad del espesor	Dispositivo sensor en la probeta y en el recinto		
ELEMENTOS DE MEDICIÓN	Micrómetro	Dispositivo automático o flexímetro	Dispositivo automático u otro	Sensores Láser flexímetro	Dispositivo automático o flexímetro
DURACIÓN DEL ENSAYO	120 min	45 min o 15 mm de deformación (lo que ocurra primero)	Nº de ciclos requeridos ó aluallamiento promedio $\geq 18\text{mm}$	Nº de ciclos requeridos ó aluallamiento promedio $\geq 20\text{mm}$	PA: 1000 ciclos o 15 mm buella PB: 10000 ciclos o 20 mm de buella
LECTURA DE DATOS	después de 3 pasadas de acondicionamiento se toman deformaciones a los 1, 3, 5min y luego c/ 5min hasta completar 45min y luego c/ 15min hasta completar el ensayo	Deformación inicial, ϵ_0 , y luego $c/5\text{min} \pm 3\text{seg}$	Lectura inicial (0) en 15 puntos designados (i); m_{ij} Leer a los 1000, 3000, 10000 y 30000 ciclos. Si fuera necesario: 30, 100, 300 y 1000 ciclos.	Lectura en 15 puntos distribuidos en 3 secciones transversales a los 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 y 14000 y si fuera necesario 30000 ciclos	Procedimiento A Acondicionamiento previo de 5 ciclos. Lectura inicial ϵ_0 y luego cada 25 ± 1 ciclos.
					Procedimiento B Acondicionamiento previo de 5 ciclos. Lectura de l posición vertical de la rueda, inicial, 6 a 7 veces en la primera hora y luego como mínimo 1 lectura c/500 ciclos

Tabla 6.4

	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA
ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETROS	- Valores medios de todas las deformaciones - Grafico Deformación de la muestra vs tiempo - Velocidad de deformación media del intervalo de tiempo t_0/t_m: $V_{m,m} = \frac{d_m - d_0}{t_m - t_0} [10^{-3} \text{ mm/min}]$ Donde: $V_{m,m}$: Velocidad de deformación para el intervalo de tiempo t_0/t_m (10^{-3} mm/min) d_m: Deformación acumulada al tiempo t (μ)	- Velocidad de deformación (mm/h). Función del n° de lecturas $TR_3 = 3.6(t_{(n-1)} - t_{(n-2)})$ $TR_{5,7} = 6(t_{(n-1)} - t_{(n-2)})$ $TR_{3,4} = 12(t_{(n-1)} - t_{(n-2)})$ $TR_{1,2} = 900/t_{15}$ Donde: n: n° de lecturas (excluye t_0) t_0: desplazamiento vertical en la t_0 lectura t_{15}: tiempo para el que se alcanza deformación de 15 mm - Velocidad de deformación corregida $W_{TR} = 10.4 * T_{RM} * \frac{W}{L} \quad (\text{mm/h})$ Donde; TR_m: Media de las TR w: ancho banda de rotadura real L: carga aplicada real $10.4 = 520 \text{ N/50mm}$ Se expresa como; $W_{TR} = (W_{TR} \pm 0.1) \text{ mm/h}$ Si los valores medidos exceden de 1.5mm/h y 1.1 veces la media, se descarta el resultado de mayor discrepancia. Si continua dicha diferencia deberá aclararse la no uniformidad	• Profundidad de huella proporcional, P_i: ahueamiento proporcional para una muestra $P_i = 100 \times \sum_{j=1}^{15} \frac{m_{ij} - m_{oj}}{15 \times h} [\%]$ Donde: m_{ij}: deformación local [mm] m_{oj}: deformación inicial [mm] h: espesor de la probeta [mm] P_{LD}: la media de los valores P_i - Grafico $\ln(P_i)$ vs $\ln(N)$ Donde: N: n° de ciclos - Temperatura de ensayo: Calculada como la media de la temperaturas registradas antes de cada medición • Profundidad de huella proporcional, P_i: ahueamiento proporcional para una muestra $P_i = 100 \times \frac{m_1 + \dots + m_n}{m \times h} [\%]$ Donde: m_i: profundidad de la huella [mm] n: n° de secciones transversales h: espesor de la probeta [mm] P_{LD}: la media de los valores de P_i - Temperatura de ensayo: Calculada como la media de la temperaturas registradas antes de cada medición
		TAMÑO GRANDE	TAMÑO EXTRA GRANDE

Tabla 6.5

ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETROS	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA
		• Profundidad de huella (mm) $def < 15 \text{ mm}$ a los 45 min $R = t_0 - t_0$ $def = 15 \text{ mm}$ a los 45 min $R = 1.5 * (45/t_0)$ Se expresa como valor medio de las profundidades de huella obtenidas: $R = (R \pm 0.1) \text{ mm}$	PROCEDIMIENTO A • Tasa de ahuecamiento (μ/ciclo), función del n° de lecturas $TR_{3,2} = 3t_3 + t_{(n-1)} - t_{(n-2)} - 3t_{(n-3)}$ $TR_{3,7} = 5t_5 - 5t_{(n-2)}$ $TR_{3,4} = 10t_5 - 10t_{(n-1)}$ $TR_{3,2} = 15000/n_5$ Donde: n: n° de lecturas tomadas c/100 ciclos hasta los 1000 ciclos (no incluye n_0) t_i: desplazamiento en la i_0 lectura (mm) n_5: n° de ciclos en que se alcanza una profundidad de huella de 15 mm TAMAYO POUÑO • Tasa media de ahuecamiento $W_{TR} = 10.4 * T_{Rm} * \frac{w}{L} \quad (mm / h)$ Donde, TR_m: Media de las TR (μ/ciclo) w: ancho banda de rodadura L: carga aplicada, en N Se expresa como: $W_{TR} = (W_{TR} \pm 0.1) \text{ mm/h}$ • Profundidad promedio de la huella (mm) $def < 15 \text{ mm}$ a los 1000 ciclos; $R_f = t_{10} - t_0$ $def = 15 \text{ mm}$ a los 1000 ciclos; $R = 15000/n_5$ Se expresa como valor medio de los R_i obtenidos: $R = (R \pm 0.1) \text{ mm}$

Tabla 6.6

	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA
ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETROS			PROCEDIMIENTO B (en aire/ en agua) - Pendiente de ahueamiento, $WTS_{air/water}$ $WTS_{air/water} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad [mm / 10^3 \text{ ciclos}]$ Donde: - Pendiente media de ahueamiento a_w: Es la media de las $TS_{air/water}$ - Profundidad de ahueamiento media proporcional, $PRD_{air/water}$: Es el promedio de la profundidad de huella respecto al espesor de 2 o más muestras expresadas en porcentaje $\pm 0.1\%$, para N ciclos de carga. Donde: - Profundidad de ahueamiento media, $RD_{air/water}$ (mm): Es el promedio de las profundidades de huella de 2 o mas muestras ± 0.1 mm, para N ciclos de carga.
REPORTE DE RESULTADOS	- Tipo y características de la mezcla - Origen de la mezcla (laboratorio, obra, testigo, etc.) - Temperatura de ensayo - Presión de contacto - Deformación total al final del ensayo, en mm - Representación gráfica curva Def. vs tiempo	- Fecha, hora y lugar de toma de muestras y N° de muestra - Fecha, hora y lugar de ensayo - Densidad de la muestra antes del ensayo - Temperatura de almacenamiento de muestras (tiempo en el que estuvieron a una temperatura dada) - Temperatura de ensayo - Espesor promedio de la muestra - Velocidad de deformación - Valores descartados en el calculo de la media - Profundidad de huella individual	INFORMACIÓN OBLIGATORIA Para cada muestra - Identificación de la muestra - Densidad de la muestra antes del ensayo, método de determinación - Temperatura del ensayo - Espesor promedio de la muestra y de las capas que pudieran observarse - N° y fecha de norma - Identificar tamaño de muestra (L, XL, S) y procedimiento (A, B₂₀) - Condiciones de ensayo y operación no incluidas en la norma

Tabla 6.7

	NORMA ESPAÑOLA	NORMA BRITÁNICA	NORMA EUROPEA
REPORTE DE RESULTADOS	• Velocidad de deformación donde se manifieste comportamiento de mezcla, como puede ser: V_{1045}, V_{7580}, V_{103120}	• Identificar si los rangos de valores de la tasa de deformación superan a los límites • Condiciones de ensayos y operación no incluidas en la norma • Anomalías que pudieran llegar a afectar los resultados • Certificado de la muestra • Persona responsable del ensayo • Nº y fecha de norma	Muestras preparadas en Laboratorio • Identificación componentes y proporciones de la mezcla • Método de manufactura de la mezcla y tipo de mezclador • Método de compactación • Fecha de realización de la probeta • Edad de la probeta al momento del ensayo • Condiciones de almacenamiento • Nº de muestras obtenidas con la misma mezcla Muestras caladas del pavimento • Fecha, hora y lugar de calado • Fecha de compactación • Si es o no aceptable la muestra <u>Muestras L o XL</u> • Profundidad de huella proporcional media, PD_L o PD_{XL} al nº de ciclos requerido <u>Muestras S</u> <u>Procedimiento A</u> • Tasa de ahuecamiento de cada probeta individual, TR • Tasa media de ahuecamiento WTR • Profundidad promedio de la huella, RD, a los 1000 ciclos <u>Procedimiento B (en aire)</u> • Pendiente de ahuecamiento p/c/ muestra • Pendiente media de ahuecamiento p/c/ grupo de 2 o mas muestras • Profundidad de ahuecamiento proporcional, PRD_m a los 10000 ciclos, individual

Tabla 6.8

	NORMA ESPAÑOLA	NORMA EUROPEA									
CANTIDAD DE MASA	S/ VOLUMEN DE MOLDE Y DENSIDAD RELATIVA MARSHALL	Donde: L: largo del molde I: ancho del molde e: espesor de la probeta ρ_{max}: densidad máxima de la muestra v: Contenido de vacíos $M = 10^{-6} \cdot L \cdot I \cdot e \cdot \rho_{max} \cdot (100 - v) / 100$									
ÁRIDOS	Secado en estufa a 105 °C y 110 °C de las distintas fracciones componentes										
VISCOSIDAD DEL LIGANTE (p/ determinar temperatura)	<table border="1"> <tr> <td>Benín asfáltico</td><td>MEZCLA</td><td>COMPACTACION</td></tr> <tr> <td></td><td>170 ± 20cSt</td><td>280 ± 30cSt</td></tr> <tr> <td></td><td>25 ± 3° Engler</td><td>25 ± 3° Engler</td></tr> </table>	Benín asfáltico	MEZCLA	COMPACTACION		170 ± 20cSt	280 ± 30cSt		25 ± 3° Engler	25 ± 3° Engler	S/ norma Pr EN 2697-35
Benín asfáltico	MEZCLA	COMPACTACION									
	170 ± 20cSt	280 ± 30cSt									
	25 ± 3° Engler	25 ± 3° Engler									
FABRICACIÓN DE LA MEZCLA	Pesar los áridos, calentarlos a 30 °C más que la temperatura de mezclado. Calcular en simultaneo el ligante a la temperatura de la mezcla (mantener no mas de 1h esa temperatura). Verter los áridos en el molde p/ mezcla y mezclar en seco. Cuando alcance la temperatura de mezclado, agregar el ligante y mezclar hasta alcanzar un mezclado completo y homogéneo (2 min máximo).										

Tabla 6.9

	NORMA EUROPEA Pr EN 12697-33			
	NORMA ESPAÑOLA	METODO 1	METODO 2	METODO 3
ELEMENTO DE COMPACTACIÓN	• Elemento compactador: placa de acero + 2 vibradores (masa excéntrica: 9.5 Kg, girando hacia el centro de la placa; velocidad angular: 314 rad/seg, fuerza excéntrica: 3KN • Collar: 33.8 x 33.8 x 5 cm • Molde: 30 x 30 x 5.1 cm • Angulares: 2 x 1.9 x 2.1 cm • Base de compactación: De hormigón, dimensiones mínimas 60 x 60 x 20 cm • Dispositivos de extensión y enrase: madera y varillas de acero de ϕ 5 mm, chapa de acero	Ruedas neumáticas • Aplicación de carga F, ajustable en 1 KN $\pm$ 10% a 10 KN $\pm$ 5% • 1 o mas ruedas c/ llantas lisas 400 x 8 • Cilindro metálico liso (ϕ40-80 cm, e: 4-8mm, ancho: 1-5mm) • Velocidad, V, de traslación de la rueda adecuada: 20-50 cm/seg $\pm$ 10% • Posicionamiento de ruedas en los ejes en $\pm$ 2cm • Operación en modo eje fijo o carga fija • Espacio para almacenar probeta • Sistema de elevación de fondo de modo de mantener la superficie a nivel de la superficie del borde del molde	Rodillo lizo de acero • Aplicación de carga tal que $\frac{F}{l \cdot D^2} \geq 10^{-3}$ 1: ancho interno del molde - D: ϕ rodillo • Collar • Elemento de compactación (mecánico, manual, de laboratorio) - C/ a volumen especificado: • Rodillo mas ancho que le molde • F tal que llegue al volumen entre 20-50 pasadas - C/ a energía controlada: • Rodillo de ancho igual al interno del molde, 1, menos 1cm	Amasado utilizando placas deslizantes • Aplicación de carga vertical, $F \pm 20\%$, constante y de magnitud tal que se alcance volumen/densidad entre 10-30 pases • Collar o placas de bases p/ variados espesores • Elemento compactador • $V_{\text{aspl}} = 25 \pm 10 \text{ cm/seg}$ • Tabla p/ apoyar el molde • Placas de deslizamiento de acero: - Longitud: 1- (0.2$\pm$0.05) cm - Ancho: (8 a 12) $\pm$0.02 cm - Espesor: (1 a 1.5) $\pm$0.01 cm • Rodillo de acero de diametro tal que permita deslizar s/ las placas, largo $\geq$ ancho del molde

6.2. Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

La Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, fue desarrollada en el 2006, por el Departamento de Vías Terrestres de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ubicada en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Su uso y fabricación se encuentra protocolizado a través de la Norma NLT-173/00. “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”.

Tiene la capacidad de evaluar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica, tanto para mezclas fabricadas como para testigos de pavimento. Para probetas circulares de 4in y 6in de diámetro.

El equipo opera de manera serboneumática y fue calibrado por el Departamento de Vías Terrestres de la U.M.S.N.H.

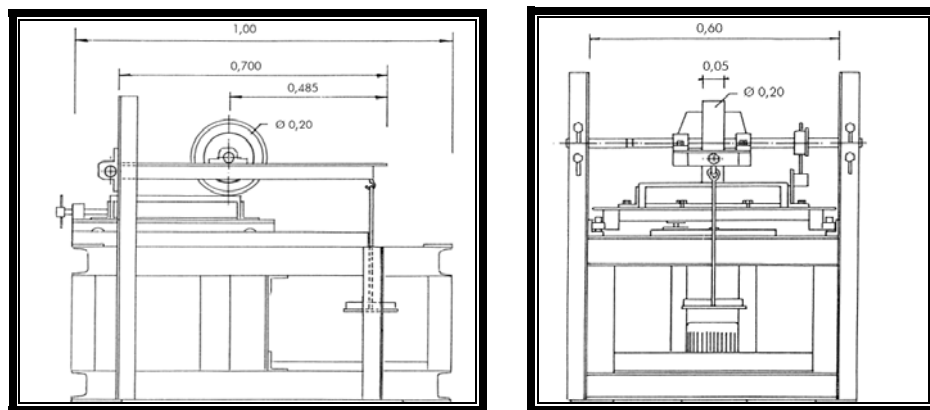


Figura 6.9 Esquema de la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH

6.2.1. Descripción del equipo.

Básicamente el equipo de ensayo de pista para medir las deformaciones permanentes es un equipo que aplica una carga constante sobre las probetas analizadas simulando el tráfico al que está sometido día a día, aplicando la carga de manera repetitiva durante un tiempo determinado. La maquina de pista se compone básicamente de 4 unidades:



Figura 6.10 Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

1. Unidad de alimentación de presión de aire
2. Unidad control y mantenimiento
3. Cámara termostática
4. Unidad de aplicación de carga y desplazamiento

Unidad de alimentación de presión de aire.

Solamente es un compresor que se encarga de alimentar el aire comprimido de manera constante, requerido para que el dispositivo se desplace a velocidad constante durante todo el ensayo.



Figura. 6.11 Compresor de aire.

Unidad control y mantenimiento

Esta unidad consta de un gabinete, el cual se encuentra equipado con todos los dispositivos para el control de la presión y la temperatura, así como una unidad de mantenimiento, necesarios para que el equipo trabaje de una manera adecuada.

Entre los aditamentos de que dispone el gabinete se encuentra básicamente una unidad de mantenimiento, ubicada en la parte exterior del gabinete y es la encargada como su nombre lo dice del mantenimiento del equipo, ya que consta de un filtro sinterizado que separa el agua y todas las sustancias y partículas que afecten el funcionamiento del equipo, así como de un control de presiones que regula y mantiene la presión constante independientemente de las oscilaciones de presión que sufra la red a raíz del consumo de aire, también se cuenta con un dispositivo de lubricación que dosifica una pequeña cantidad de aceite con el aire para que el equipo se encuentre en lubricación constante y trabaje de una forma adecuada,

además se cuenta también con una válvula de cierre de accionamiento manual, para cortar la alimentación del aire en caso de que esto sea necesario.

En la parte interior del gabinete también se cuenta con otras 2 válvulas que se encargan de inyectar y regular la presión de aire que requiere el equipo para desplazarse de un lado hacia otro con una velocidad constante. Otro dispositivo que se encuentra alojado dentro del gabinete es un control digital de temperatura (termopar), para manejar los niveles de temperatura de forma manual y mantenerla constante (60°C) durante todo el ensayo.



Figura. 6.12 Unidad control y mantenimiento

Cámara termostática.

Como se mencionó anteriormente se requiere que para la realización del ensayo la temperatura sea constante, y para lograrlo se construyó una cámara con paredes aislantes, con las dimensiones necesarias para alojar dentro de ella a la *unidad de aplicación de carga y desplazamiento*, cuenta con dos puertas abatibles con paneles de policarbonato, con la finalidad de poder observar el ensayo, así como las deformaciones que van sufriendo las probetas ensayadas, parte esencial de la cámara son las resistencias de las cuales la cámara contiene dos en la parte superior de esta, así como un ventilador que nos proporciona una circulación del aire, con el fin de homogeneizar la temperatura en toda la cámara, y para

verificar que la temperatura sea la adecuada, se colocó un termopar dentro de esta, que se encarga de mandar una señal al panel de control donde se registra la temperatura dentro de la cámara.

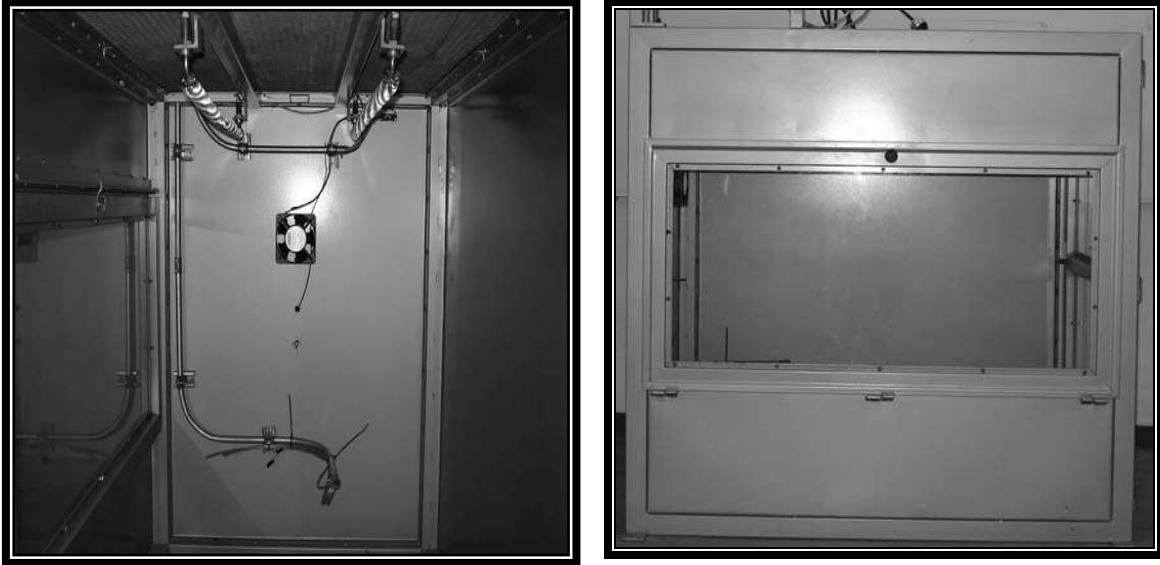


Figura 6.13 Cámara Termostática (derecha), Vista interior de la cámara (izquierda)

Unidad de aplicación de carga y desplazamiento

Básicamente el equipo consiste en una armadura de acero en la que se ubican: un actuador lineal neumático que desplaza a un carro rectangular móvil apoyado en unas ruedas metálicas, en un movimiento alternativo horizontal de vaivén a una velocidad de 42 ± 1 pasadas por minuto y un recorrido de $23 \pm 0,5$ cm. limitado por dos sensores fijados en la parte lateral del actuador. En la parte superior del carro de desplazamiento van colocadas las probetas de asfalto sobre las cuáles se apoya una rueda metálica forrada de goma, de 20 cm. de diámetro y 5 cm. de ancho unida a un brazo en el cual en uno de sus extremos van colocadas las pesas necesarias para aplicar una carga constante de 9 ± 0.25 kgf/cm², la rueda también va provista con un micrómetro que registra la deformación acumulada durante el ensayo.



Figura 6.14 Unidad de aplicación de carga.



Figura 6.15 Unidad de desplazamiento.

6.3. Fabricación de las probetas.

El proceso de elaboración de las probetas es mediante el procedimiento descrito en el manual AASHTO T-245-97 (2001) “Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus”, (4 in de diámetro). Una vez elaboradas las probetas se cortan a

una altura de 5 cm, para poder ser colocadas dentro de los moldes correspondientes a la prueba de pista.



Figura 6.16 Mezclado (izq.), Moldes (der.)



Figura 6.17 Compactador (izq.), Probetas Marshall (der.)

6.4. Descripción de la prueba.

6.4.1 Temperatura de ensayo.

La temperatura normalizada para el ensayo será de $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. No obstante, pueden utilizarse otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran.

6.4.2 Presión de contacto de la rueda.

La presión de contacto normalizada ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo, será de $(900 \pm 25) \text{ kN/m}^2$, $[(9 \pm 0,25) \text{ kgf/cm}^2]$, para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. Sin embargo, en casos especiales o cuando así se requiera, pueden utilizarse otras presiones de contacto.

6.4.3 Ejecución del ensayo.

Las probetas se introducen en un horno regulado a $(60 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante cuatro horas como mínimo antes de la ejecución del ensayo. Dos horas antes del comienzo del ensayo se conecta el sistema de calefacción de la cámara termostática, regulándolo a la temperatura especificada (60°C). Transcurrido este tiempo, se sacan las primeras probetas de la estufa, se levanta la rueda y se fija el molde con las probetas en los anclajes que para este fin lleva el carretón móvil, sin que la rueda toque en ningún momento la superficie de las probetas. En estas condiciones se carga el brazo soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión especificada, se cierra la cámara y se espera unos 30 minutos con objeto de homogeneizar la temperatura del ensayo. Seguidamente se apoya la rueda cargada sobre la superficie de la probeta y se pone en marcha el carretón durante tres pasadas completas, para conseguir un asentamiento de la rueda sobre las probetas. A continuación se para el carretón y, situándolo en el punto de medida del micrómetro, se pone éste a cero. Se cierra entonces la ventana lateral y transcurridos unos 5 minutos se comienza el ensayo, poniendo en movimiento el carretón durante un periodo de tiempo de 120 minutos sin interrupciones, o hasta que la deformación total alcance 15 mm, si ocurre antes, haciendo periódicamente las correspondientes lecturas de la deformación.. Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda, y se extraen las probetas ensayadas, colocando seguidamente las siguientes y repitiendo el mismo procedimiento de ensayo tal como se ha descrito.

6.5. Obtención de los resultados

Se determinan y anotan las deformaciones totales leídas en el micrómetro en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo; a continuación cada 5 minutos hasta completar los 45 minutos y, a partir de aquí, cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

Ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones registradas correspondientes, los cuales se pasan a un gráfico deformación-tiempo y se dibuja la curva de deformación de la mezcla.

A partir de las deformaciones, d_t determinadas en el gráfico, correspondientes a los tiempos t del ensayo, se calcula, mediante la fórmula:

$$V_{t_2} / V_{t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{d_2 - t_1}$$

la velocidad, V , de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t_2/t_1 , parámetro que vendrá expresado en 10^{-3} mm/min.

Tabla 6.10 Presión para las velocidades de deformación (mm/h) en mezcla de laboratorio y pavimento

Muestras	Nivel del resultado de ensayo (mm/h)	Repetibilidad r (mm/h)	Reproducibilidad R (mm/h)
Laboratorio	2,6	0,6	1,2
Firme	2,2	0,8	1,4
	8,1	3,1	5,9
	13,5	4,0	5,7

Capítulo

7

Ensayos de Laboratorio

7.1 Procedimiento experimental

Es de suma importancia la parte experimental de toda investigación, y en este trabajo no fue la excepción, el laboratorio fue la parte fundamental para llevar a cabo esta investigación. A continuación se presenta un esquema del procedimiento experimental que se siguió para el desarrollo de esta investigación, Figura 7.1.

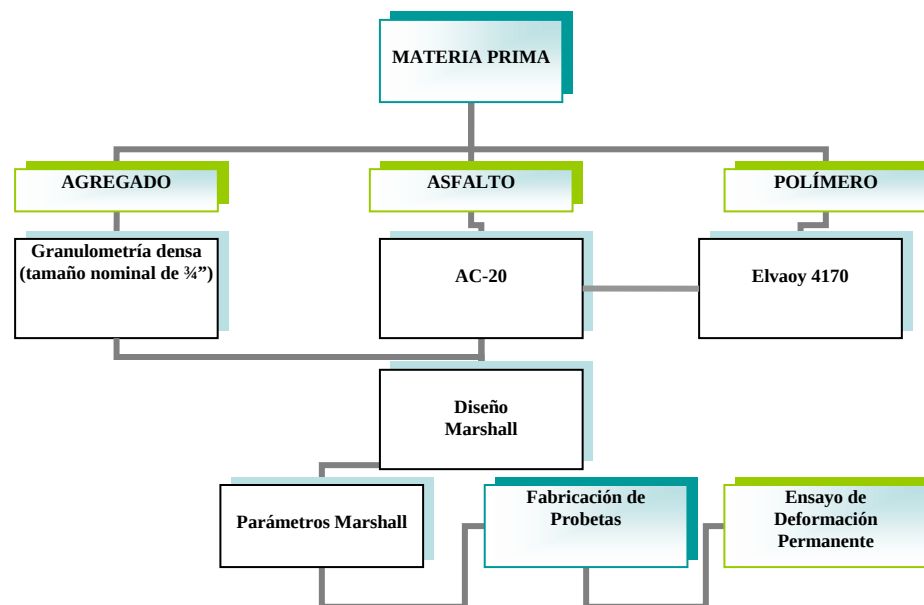


Figura 7.1 Esquema del procedimiento experimental.

7.2 Caracterización del material

Primeramente para la presente investigación se tomó la decisión de trabajar con materiales pétreos de la región de Morelia, Michoacán, y los asfaltos tanto el convencional como el modificado los proporciono la empresa Sufax de la ciudad de Guadalajara Jalisco.

La caracterización de los materiales consiste en evaluar las propiedades físicas del agregado pétreo y del asfalto, de acuerdo con la metodología que marca la normativa SCT. (N-CTM-4-04-03 “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”, N-CTM-4-05-001-05 “Calidad de Materiales Asfálticos”, N-CTM-4-05-002-01 “Calidad de Materiales Asfálticos Modificados”).

7.2.1 Agregados pétreos

Muestreo

Como material pétreo se uso un material basáltico triturado, para lo cual se procedió a la toma de muestras representativas de material triturado que se tomaron del Banco de Sánchez Arreygue, de la ciudad de Morelia, ubicado en la carretera Morelia – Salamanca.

De dicho banco se tomaron seis muestras de diferentes tamaños de material, de las cuales dos fueron de grava de $\frac{3}{4}$ ”, otras dos de sello ($\frac{3}{8}$ ”a finos), y por último dos más de arena con finos; teniendo cuidado en verificar que el material estuviera libre de impurezas.

Para la toma de las muestras se procedió a remover el material ubicado en la parte superior de los montículos, y una vez que se observó que el material estaba limpio y homogéneo se procedió al llenado de los costales, que posteriormente trasladamos al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H.

Cabe mencionar que los materiales se encontraban en estado húmedo, debido a que nos encontrábamos en época de lluvias, por lo que se tuvo que extender sobre una superficie limpia (Fig 7.2), para que los rayos del sol secan el material.



Figura 7.2 Secado del material pétreo

Granulometría

Después del secado de las muestras lo primero que se realizó fue obtener la granulometría de cada una de ellas, con el objeto de determinar la composición de tamaños de las partículas del material a emplear, por lo que se procedió a extenderlo sobre una superficie limpia para realizar un cuarteo, se mezcló el material apilándolo para formar una especie de cono, una vez que este estaba bien mezclado se extendió hacia la periferia para formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura; con ayuda de una regla, dividimos el cono en cuatro partes iguales, de las cuales tomamos las 2 partes opuestas para obtener nuestra muestra representativa.

Una vez tomada la muestra se acomodaron las mallas (Figura 7.3) en orden según el tamaño del material a cribar, ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 y charola).

Hecho esto se procedió a el cribado del material en las mallas, lo cual se realizó en forma mecánica para las arenas y finos y de manera manual para las gravas.

Finalmente determinamos el peso retenido en cada malla y así calcular la granulometría. Este procedimiento se realizo para las tres muestras extraídas del banco.



Figura7.3 Mallas y equipo mecánico de cribado

Densidad Relativa

La prueba de densidad relativa se realizó con el fin de conocer la masa de los sólidos por unidad de volumen; se determino para cada una de sus fracciones, ya sea en arena con finos, en sello ó en grava, todo con respecto a la densidad del agua.

Para la arena con finos la prueba consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición, el tamaño de la muestra, que en este caso se tomó fue 100grs aproximadamente (P_s) completamente seca,

Utilizando un embudo, se colocó la muestra que pasó la malla No 4 en un matraz con marca de aforo (Figura 7.4), previamente calibrado; y se llenó con agua destilada hasta la mitad del matraz y se puso en una estufa hasta que alcanzó el punto de ebullición agitándolo constantemente hasta expulsar el aire atrapado.



Figura 4.4 Matraz con marca de aforo

Se dejó enfriar el matraz y una vez que alcanzó la temperatura ambiente se llenó con agua destilada hasta la marca de aforo; posteriormente se secó superficialmente y se pesó (P_2) con su respectivo tapón; se agitó varias veces con la finalidad de uniformar la temperatura de la suspensión y se colocó un termómetro dentro del matraz para medir la temperatura (t_p).

Finalmente utilizando las curvas de calibración del matraz, se obtuvo el peso del matraz con agua (P_1), correspondiente a la temperatura de prueba (t_p).

Para el caso del material grueso (retenido en la malla 3/8”), el procedimiento fue diferente, ya que para este material se tomó una muestra de 500 grs. y se saturó en agua durante 24 hrs.

Pasado este tiempo lo secamos superficialmente de manera rápida; y en un picnómetro (Figura 7.5), lleno con agua destilada colocamos la muestra; recolectando el agua

desalojada por este en una probeta graduada, de la cual tomamos el volumen de agua desalojada en cm^3 (V_t);



Figura 7.5 Picnómetro para determinación de densidad de gravas

Posteriormente se saco el material del picnómetro y se puso a secar en el horno durante 24 hrs., registrando su peso seco (P_i)

Realizamos tres pruebas de cada material, de las cuales obtuvimos un promedio para cada uno. La densidad para arenas se obtuvo mediante la formula:

$$D_{rsf} = \frac{P_s}{P_s + P_1 - P_2}$$

La densidad de las gravas se determino utilizando una densidad del agua de 1 gr/cm^3 con la siguiente ecuación:

$$D_{rg} = \frac{P_i}{V_t \cdot (D_w)}$$

Equivalente de arena

Con esta prueba se determinó el contenido de los materiales finos o arcillosos presentes en el material pétreo a utilizar en la elaboración de la mezcla asfáltica.

La prueba consistió en agitar una muestra de material, previamente cribado, del cual se tomo la porción que pasa la malla No. 4, y se mezcló en solución.

El procedimiento de prueba se llevó a cabo de la siguiente manera:

En un cilindro de Prueba se vertieron 4in, de solución medidas con la graduación del cilindro.

El siguiente paso fue tomar la muestra que pasaba la malla No. 4 y colocarla en una cápsula de 90 ml. Para posteriormente y con la ayuda de un embudo colocarla junto con la solución; dentro del cilindro de prueba.

Se dejó reposar el material durante 10 minutos y se tapó el cilindro con un tapón, para agitarlo de un lado a otro durante 90 ciclos en un tiempo de 30 segundos.

Se colocó el cilindro sobre una meza y se llenó con la solución hasta 15in de altura, cuidando no provocar demasiadas turbulencias en la solución con la muestra.

Se dejó reposar durante 20 minutos más, para que se pudiera observar y medir el nivel superior de finos en suspensión (LNS_{finos}),

Posteriormente se introdujo una varilla con pisón dentro del cilindro y se observó el nivel superior de la arena (LNS_{arena}).

$$\%EA = \frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} \times 100$$



Figura 7.6 Equipo para la obtención del equivalente de arena

Partículas alargadas y lajeadas.

Esta prueba nos permitió conocer la forma que tienen las partículas de materiales pétreos, para lo cual se tomaron 2 muestras de 200 piezas aproximadamente del material que se retuvieron en la malla No. 4 y se pasaron por los calibradores de espesores y longitudes.

Para el caso de las partículas alargadas, se pasaron por el calibrador, buscando que la dimensión mayor de cada pieza fuera paralela al eje del calibrador, posteriormente se pesaron todas las partículas que habían pasado por sus respectivas ranuras, y las registramos como (m_a).

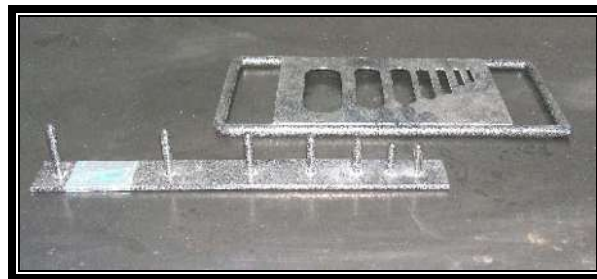


Figura 7.7 Calibrador para partículas alargadas y lajeadas

En el caso de las partículas lajeadas, se buscaba que las piezas pasaran por las ranuras del calibrador colocándolas en la posición mas adecuada. Se separaron todas las partículas que pasaron por el calibrador y se obtuvo su peso en grs, designándola como (m_e).

Los resultados se obtuvieron mediante las siguientes formulas, donde M es el peso total de cada muestra:

$$C_a = \frac{m_a}{M} \times 100$$

$$C_p = \frac{m_e}{M} \times 100$$

Desgaste de los Ángeles

Con esta prueba determinamos la resistencia abrasiva de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

Para lo cual colocamos una muestra del tipo B (de acuerdo a la normativa descrita en el manual M-MMP-4-04-006/02), dentro de la máquina de los Ángeles (2500 grs. del material comprendido entre las mallas $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ", y otros 2500 grs. del material comprendido entre las mallas $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{8}$ ", (P_i))

Dentro de la máquina también colocamos 11 esferas como carga abrasiva con una masa de aproximadamente 4584 grs.

Se puso en marcha la máquina durante 500 revoluciones (aprox. 16min).

Posteriormente se saco el material, y se paso por la malla No. 12 para después determinar el peso que se retuvo en dicha malla, registrándolo como (P_f) en grs.

El % de desgaste se obtiene mediante la siguiente formula:

$$P_a = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$



Figura 7.8 Máquina de los Ángeles

Una vez que se obtuvieron las granulometrías individuales de cada material y las características mecánicas y físicas de los mismos; se trato de ajustar a la curva granulométrica de la normativa SCT para granulometría densa tratando de que pasara por el centro de los límites que esta marca.

Para lograr ajustar la curva granulométrica del material se tubo que separar en 5 fracciones; ($\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ", $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ", $\frac{1}{4}$ " a la 20, 20 a 40 y pasa 40).

De dichas fracciones se obtuvo su granulometría individual para posteriormente poder determinar los porcentajes que se tomarían de cada porción, que resultaron ser de 5%, 35%, 40%, 5% y 15% respectivamente.

7.2.2 Cementos Asfálticos.

En esta ocasión no se determinaron las propiedades de los cementos asfálticos en el laboratorio de la universidad ya que estos fueron proporcionados por la empresa **SURFAX S.A de C.V.**, que fue la empresa que nos proporciono el asfalto convencional y modificado.

Sin embargo describiremos las pruebas que se hacen con el propósito de caracterizar los tipos de cementos asfálticos utilizados, el viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de corte dinámico (DSR).

Viscosímetro rotacional (RV)

La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 4.8) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa.s respectivamente.

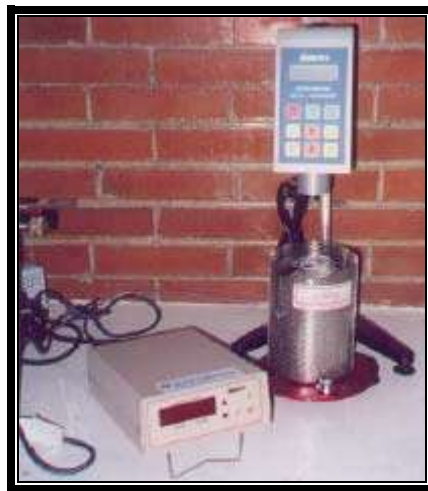


Figura 7.9 Viscosímetro Rotacional

Reómetro de corte dinámico (DSR)

Se lleva a cabo la caracterización de los cementos asfálticos en el DSR (Figura 4.9) con el fin de evaluar su contribución a resistir las deformaciones plásticas en la mezcla, con base en la medición del parámetro reológico $G^*/\sin \delta$.

La prueba se realiza a los asfaltos en su estado original y envejecido en el horno RTFO.



Figura 7.10 Reómetro de corte dinámico.

7.3 Diseño Marshall

El diseño Marshall se realizó en base a la normativa AASHTO T 245-97(2001) *“Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas usando el Equipo Marshall”*.

Para la elaboración de las pastillas Marshall se dosificaron 1100grs de material pétreo, utilizando los porcentajes de materiales mencionados anteriormente en el ajuste granulométrico.

En la elaboración del diseño se utilizó un asfalto modificado únicamente para la obtención de un óptimo de asfalto, para lo cual se realizaron mezclas empleando porcentajes de asfalto de 4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%.

Los materiales fueron colocados en el horno (Figura 7.11) a una temperatura de 180 °C aproximadamente, y una vez que se acondicionaron a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso respecto a la mezcla total. Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente.



Figura 7.11 Horno para secado del material pétreo.

Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes (Figura 7.12) deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación.



Figura 7.12 Molde Marshall.

Para la compactación se utilizó el compactador Marshall (Figura 7.13) el cual consta de un pisón de compactación de forma circular en la base, con diámetro de 9.84cm, equipado con una pesa deslizante de 4.536 kg. de peso, cuya altura de caída es de 45.7 cm, por medio del cual proporcionamos una compactación de 75 golpes por cara.

Dejamos enfriar las pastillas elaboradas y posteriormente las desmoldamos, indicándoles el porcentaje y numero de pastilla a cada una (Fig 4.14).



Figura 4.13 Compactador Marshall



Figuras 4.14 Pastillas Marshall

Ya que estaban elaboradas las pastillas se dejaron enfriar durante 24 hrs.; se pesaron secas, sumergidas en agua y saturadas superficie seca, además de que se determino el promedio de las alturas de cada pastilla, para posteriormente colocarlas en baño maría (Figura 7.15) durante 30 minutos cada pastilla, al transcurrir este tiempo se sacan y se secaron superficialmente y colocaron dentro de la prensa Marshall (Figura 4.16) para obtener la estabilidad y flujo de cada mezcla.



Figura 7.15 Baño maría

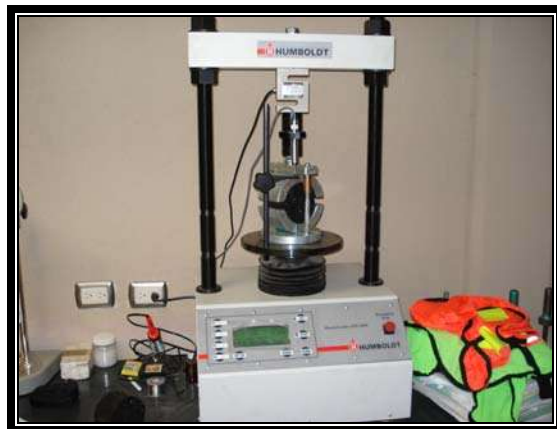


Figura 7.16 Prensa Marshall

Una vez obtenidos los parámetros de estabilidad y flujo de cada pastilla, se continuó con el cálculo de los parámetros de vacíos en la mezcla, vacíos en el agregado mineral, vacíos ocupados por el asfalto y el peso volumétrico de cada pastilla para obtener un optimo de asfalto en base al porcentaje de asfalto que mejor comportamiento tubo, en cuanto a los parámetros mencionados anteriormente y que están normados por la SCT.

7.4 Ensayo de Pista.

La evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente, se realizó mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.(Figura 7.17)



Figura 7.17 Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Para la realización del ensayo de pista, se trabajo previamente en la calibración del equipo, para ajustarlo a la carga, el número de ciclos y la temperatura de ensayo que marca la normativa española (NLT 173/84 “Resistencia a la Deformación Plástica de Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio”).

Una vez que se logro tener calibrado el equipo, se procedió a la elaboración de pastillas Marshall para porcentajes del 5%, 6% y 7%; en este caso se utilizo un asfalto convencional AC-20 y un asfalto modificado PG-82, fabricando seis pastillas por cada porcentaje y por cada tipo de asfalto.

Cada ensayo requería de tres de estas pastillas a las cuales se les determinaban los parámetros Marshall, a excepción del flujo y la estabilidad

Se cortaron las pastillas a una altura de 5cm., y se colocaron en el horno de 3 a 4 horas antes de que comenzara el ensayo a 60 °C.

Se encendían las resistencias de la máquina para que esta también llegara a la temperatura de ensayo.

Transcurrido el tiempo, se sacaron las pastillas del horno y se colocaron en el molde para ser fijadas al carro de desplazamiento.

Una vez que estaban bien colocadas las pastillas en el molde, se procedía a cerrar la cámara termostática para que se alcanzara la temperatura de ensayo nuevamente dentro de esta y se encendía el compresor.

Ya que la temperatura era la adecuada, se colocaba la rueda sobre las pastillas y se daba una serie de pasadas para asentar la llanta.

Se colocaba el micrómetro en ceros y se comenzaba con el ensayo.

Medimos la deformación acumulada al minuto de iniciado el ensayo, para después medirla a los tres y cinco minutos, después cada cinco minutos hasta llegar a los 45, y por último cada 15 minutos hasta cumplir con los 120 minutos de ensayo.

Para esto debíamos verificar que no variara la velocidad de la rueda por la presión de aire que proporcionaba el compresor y que la temperatura se mantuviera en el rango de los 60 °C.

Terminado el ensayo, procedíamos a desmontar las pastillas para la realización de un nuevo ensayo.

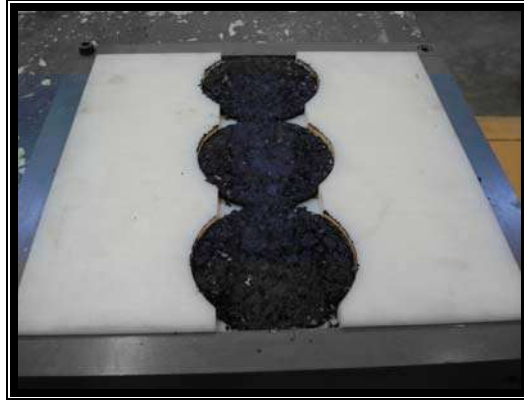


Figura 7.18 Pastillas colocadas en el molde



Figura 7.19 Deformación provocada por la rueda.

Capítulo

8

RESULTADOS Y COMPORTAMIENTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON AC-20 Y ASFALTO MODIFICADO PG-82.

Con base en la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, para pavimentos flexibles, partiremos analizando los materiales utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa, para cualquier valor de ejes equivalentes (ESALs).

8.1 Propiedades físicas del agregado pétreo.

En el caso de los agregados pétreos, se trató de verificar que los agregados cumplieran con lo que marca la normativa SCT (*N-CTM-4-04/03 “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”*)

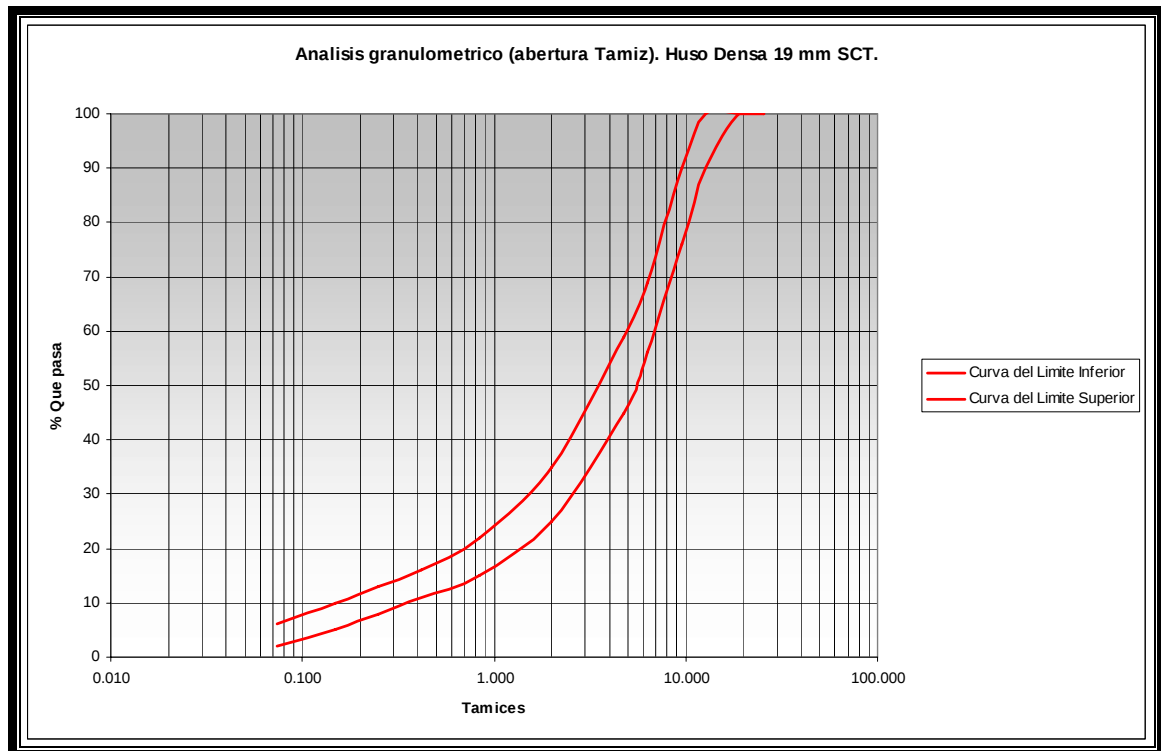
Tabla 8.1 Propiedades Mecánicas de los Agregados

Parámetro	Valor (Norma)	Valor (Laboratorio)
Densidad Relativa, mínimo	2.4	2.61
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30	13.6
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35	84, 25
Equivalente de arena; %, mínimo	50	73

Como podemos observar el material cumple con la característica de *Densidad Relativa*, de una forma adecuada. Así como también con el parámetro de *Desgaste de lo Ángeles* y *Equivalente de Arena*, únicamente se tuvo problemas debido a que las partículas tienen una forma alargada que puede afectar de manera significativa.

8.2. Consideraciones Granulométricas del Pétreo.

Partiendo del Huso granulométrico Densa 19 mm. de la Normativa Mexicana de la SCT. Se tienen los siguientes límites mostrados en la figura siguiente, los cuales se usarán para la composición de la granulometría y la posterior fabricación de las mezclas.



Figuras 8.1 Límites del Huso Granulométrico Densa 19 mm., SCT.

Tabla 8.2 Granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (19 mm) S.C.T.

Abertura (mm)	Malla	Densa 19mm	
		Limite inferior % Que pasa	Limite superior % Que pasa
25.400	1"	100	100
19.050	3/4"	100	100
12.700	1/2"	90	100
9.520	3/8"	76	90
6.350	1/4"	56	69
4.760	No. 4	45	59
2.000	No. 10	25	35
0.840	No. 20	15	22
0.420	No. 40	11	16
0.250	No. 60	8	13
0.149	No. 100	5	10
0.074	No. 200	2	6

Una vez conocidos los valores equivalentes de los porcentajes que pasan por los tamices de las curvas superior e inferior, se elaboró una curva intermedia, que será con la cual se trabajara, para los ensayos, a continuación se presenta la figura 8.2.

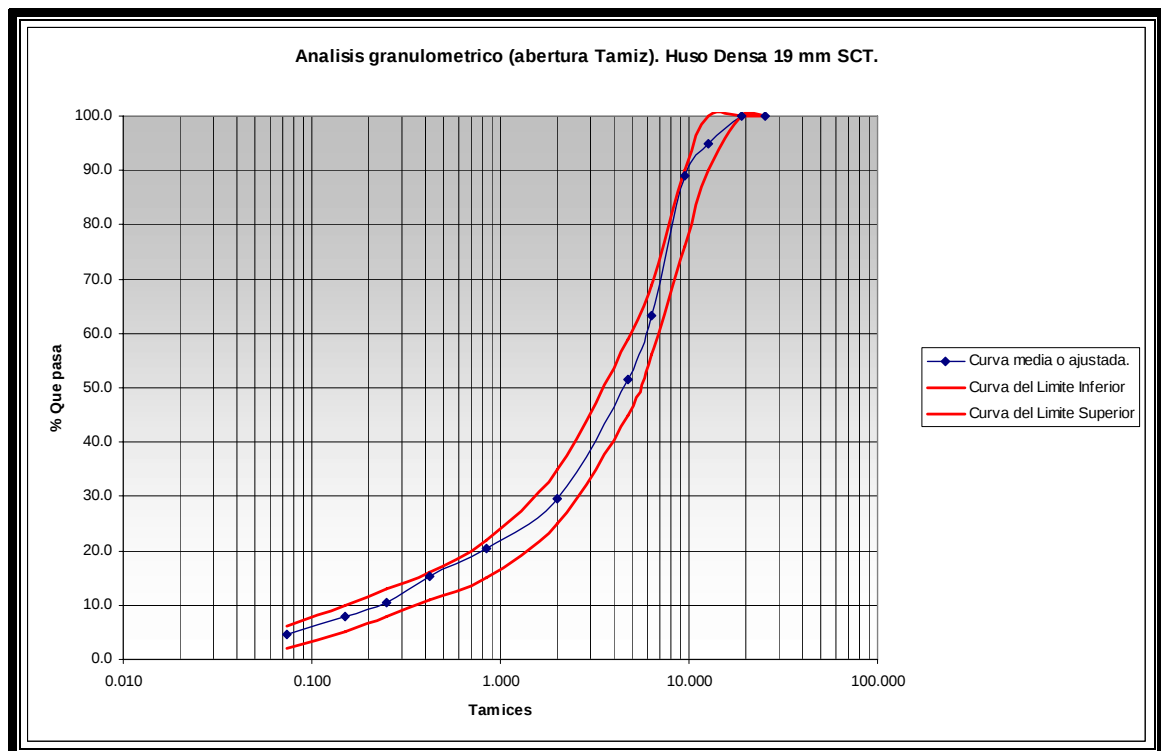


Figura 8.2 Curva granulométrica media, utilizada para los ensayos Marshall y de Máquina de Pista.

Tabla 8.3 Granulometría del material pétreo ajustado para carpetas asfálticas de granulometría densa (19mm) S.C.T.

Abertura (mm)	Malla	Densa 19mm		
		Curva inferior	Curva ajustada	Curva superior
		% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
25.400	1"	100	100.0	100
19.050	3/4"	100	100.0	100
12.700	1/2"	90	95.0	100
9.520	3/8"	76	89.1	90
6.350	1/4"	56	63.2	69
4.760	No. 4	45	51.6	59
2.000	No. 10	25	29.5	35
0.840	No. 20	15	20.3	22
0.420	No. 40	11	15.2	16
0.250	No. 60	8	10.5	13
0.149	No. 100	5	7.8	10
0.074	No. 200	2	4.5	6

8.3 Propiedades físicas de los asfaltos empleados

Para la elección del cemento asfáltico, se optó por uno de los de mayor consumo a nivel nacional, el cemento asfáltico AC-20. La caracterización del mismo conforme a la Normativa SCT (*N-CTM-4-05-001/05 "Calidad de Materiales Asfálticos"*) para uso vial (Clasificación por viscosidad). Se resume en la Tabla 8.4

Tabla 8.4 Requisitos de calidad para un cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C

Características	Valor	Valor
Del cemento asfáltico original:	(Norma)	(Laboratorio)
Viscosidad Dinámica a 60°C; Pa·s	200 ± 40	
Viscosidad Cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1mm ² /s = 1centistoke)	300	
Viscosidad Saybolt - Furol a 135°C, s, mínimo	120	
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 10 ⁻¹ mm, mínimo	60	
Punto de inflamación de Cleveland; °C, mínimo	232	
Solubilidad, %, mínimo	99	
Punto de Reblandecimiento; °C	48 - 56	
Del residuo de la prueba de la película delgada:		
Pérdida por calentamiento; %, máximo	0.5	
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s, máximo	800	
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	50	
Penetración retenida a 25°C, %, mínimo	54	

El asfalto modificado se trabajó en los laboratorios de SURFAX S.A DE C.V. clasificado según la normativa SCT (N-CTM-4-05-002/01 “Calidad de materiales Asfálticos Modificados”); como un “Polímero Tipo I” que mejorará su comportamiento tanto a altas como a bajas temperaturas, el cual una vez modificado presentó las siguientes características (Tabla 8.5).

Tabla 8.5 Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-20 modificados (Tipo I)

Características	Valor	Valor
Del cemento asfáltico original:	(Norma)	(Laboratorio)
Viscosidad Saybolt - Furol a 135°C, s, máximo	1000	
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	4	
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177 °C; Pa s, máximo	- - -	
Penetración:		
• a 25°C, 100 g, 5 s, 10 ⁻¹ mm, mínimo	40	
• a 4°C, 200 g, 60 s, 10 ⁻¹ mm, mínimo	25	
Punto de inflamación de Cleveland; °C, mínimo	230	
Punto de Reblandecimiento; °C, mínimo	55	
Separación, deferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	
Recuperación elástica por torsión a 25 °C; %, mínimo	30	
Resiliencia, a 25 °C, mínimo	20	
Del residuo de la prueba de la película delgada: (3.2 mm, 50 g)		
Pérdida por calentamiento a 163 °C; %, máximo	1	
Ductilidad a 4°C y 5 cm/min; cm, mínimo	7	
Penetración a 4 °C, 200 g, 60 s, 10 ⁻¹ mm, mínimo	- - -	
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s; %, mínimo	65	
Recuperación elástica en ductilometro a 25 °C; %, mínimo	50	
Incremento en temperatura anillo esfera; °C, máximo	- - -	
Modulo reológico de corte dinámico a 76 °C ($G^*/\text{sen } \delta$); kPa, mínimo	2.2	
Modulo reológico de corte dinámico a 64 °C ($G^*/\text{sen } \delta$); kPa, mínimo	- - -	
Angulo de fase (δ) [visco-elasticidad], a 76 °C; ° (grados), máximo	75	
Angulo de fase (δ) [visco-elasticidad], a 64 °C; ° (grados), máximo	- - -	

8.4 Ensayo Marshall.

A continuación se muestra un cuadro de Resumen de Resultados de las probetas sometidas al Ensayo Marshall, para la mezcla asfáltica elaborada a partir de la curva granulométrica (Curva Media o ajustada) y para un asfalto modificado. En dicho cuadro se podrán observar los valores promedio de la Densidad, Estabilidad, Deformación Vacíos en la Mezcla y Vacíos en los Agregados.

Tabla 8.6 Resumen de resultados del ensayo Marshall de la mezcla asfáltica elaborada con la curva granulométrica Media o ajustada y con el Asfalto Modificado y con sus diferentes contenidos asfálticos.

Contenido de Asfalto %	No. De Probetas	Estabilidad media (Kg/cm ²)	Flujo medio (mm)	Vacíos medios %	VAM medio %
4.5	1	1460.81	4.17	3.06	12.57
	2				
	3				
	4				
5	5	1428.64	2.97	2.76	13.24
	6				
	7				
5.5	8	1343.87	4.10	3.53	14.84
	9				
6	10	1343	2.97	3.93	16.09
	11				
	12				
6.5	13	1461.27	3.67	4.39	17.37
	14				
	15				

A continuación se presentan las figuras obtenidas por el ensayo Marshall.

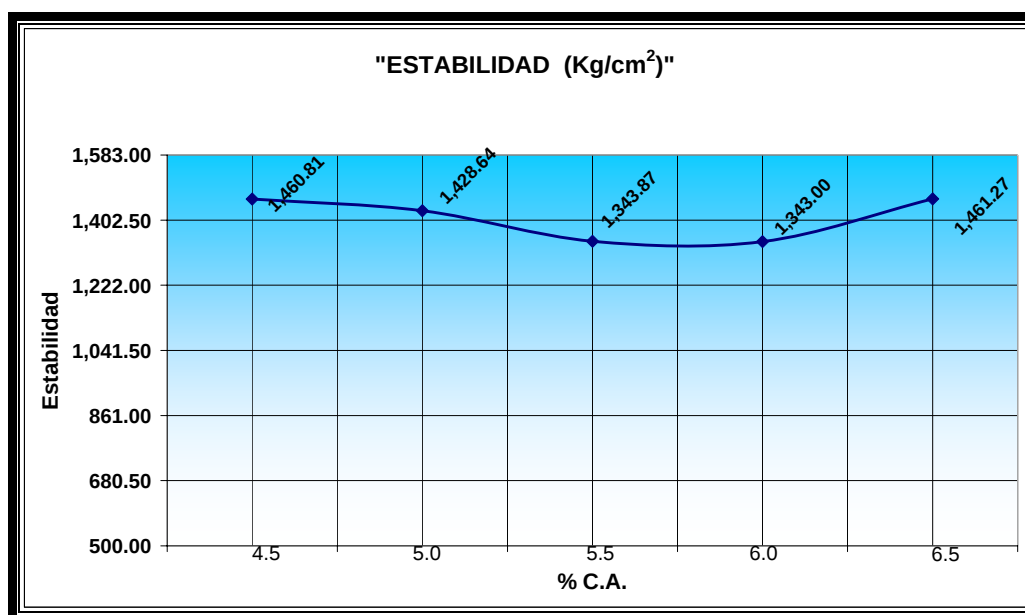


Figura 8.3 Estabilidad (kg/cm²)

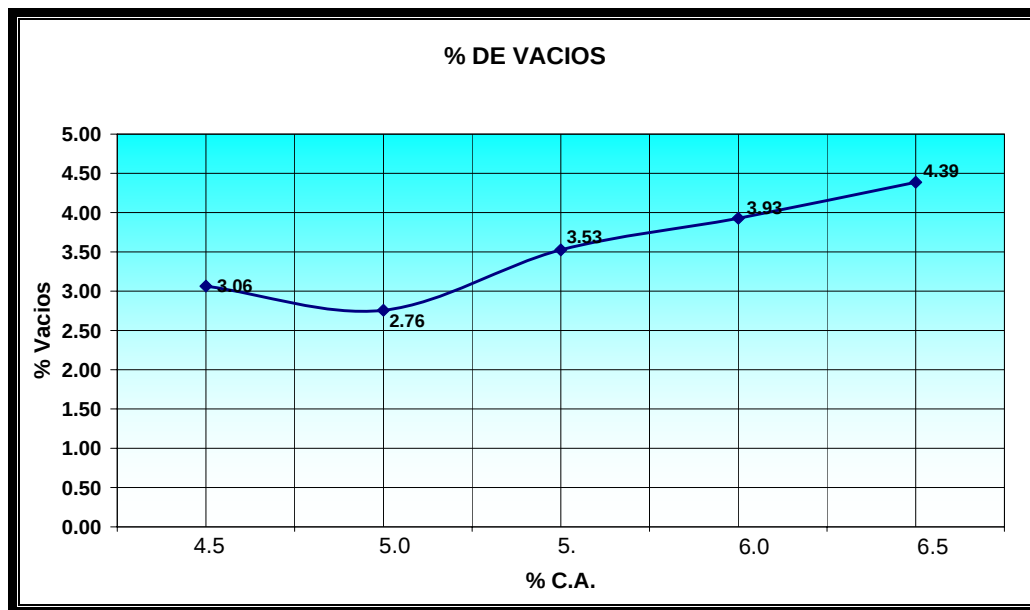


Figura 8.4 % de Vacíos.

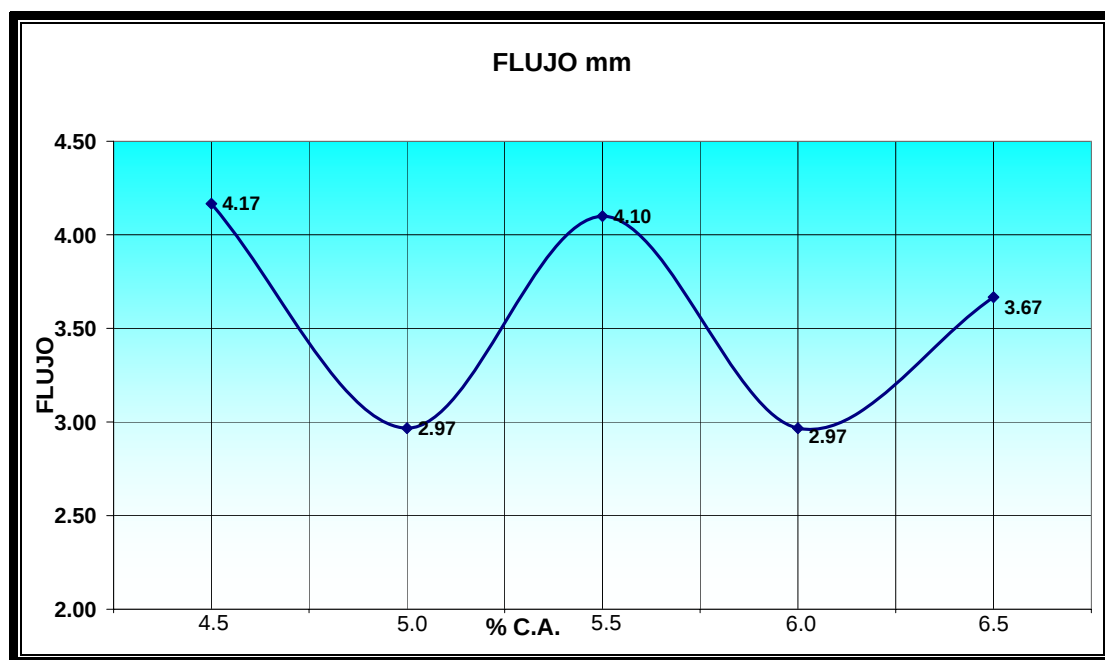
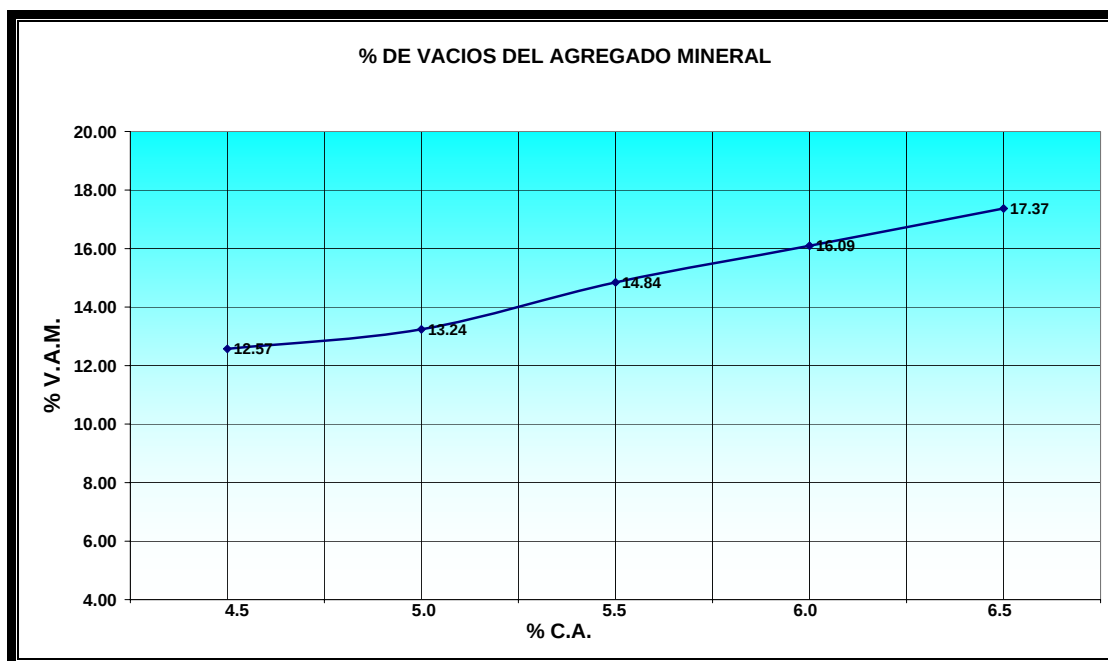


Figura 8.5 Flujo (mm)



Gráfica 8.6 % de Vacíos del Agregado Mineral.

Después de la obtención de los resultados y apegándose a la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para elegir un porcentaje (%) optimo de Cemento Asfáltico se concluyó que el 6% es el porcentaje óptimo, ya que se cumple con los parámetros Marshall.

Tabla 8.7 Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall. SCT.

Parámetro	Valor (Norma)	Valor (Laboratorio)
Estabilidad; N, mínimo	8000	13170
Flujo; mm	2-3.5	2.97
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3-5	3.93
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65-75	75.60
P.V.M.	Sin Norma	- - -
Vacios en el agregado mineral (VAM); % mínimo (para 4% de VMC)	13	16.09

8.5 Ensayo de Pista.

Se fabricaron 18 probetas para el Asfalto Convencional AC-20, para realizar 2 pruebas por cada contenido de Asfalto, ya que se requieren de 3 probetas por prueba, y se tienen 3 porcentajes (%) de Asfalto, (5%, 6%, y 7%). Y al igual que el Asfalto Convencional,

también para el Asfalto Modificado se fabricaron 18 probetas, ya que al igual que el asfalto convencional se evaluarán los mismos puntos.

Tabla 8.8 Probetas Fabricadas para el Ensayo de Pista.

Tipo de Asfalto	Número de probetas por porcentaje (%) de Asfalto.			Total de probetas
	5%	6%	7%	
AC-20	6	6	6	18
Modificado PG-82	6	6	6	18

Como ya se había mencionado el Ensayo de la Máquina de Pista se evaluará mediante la Normativa Española, que es en este sentido más estricta que la nuestra ya que los pavimentos flexibles en México se diseñan para un Eje Equivalente de 8,2 toneladas y en España los pavimentos se diseñan para un Eje Equivalente de 13 toneladas.

Cada una de las probetas de pista será ensaya con la carga por Eje Equivalente verificando la severidad de las deformaciones plásticas. En la Normativa NLT-173/00 se especifica una presión de contacto de la rueda con la probeta, de $9 + 0.25 \text{ kg/cm}^2$ que equivale al eje equivalente español.

A continuación se muestran las tablas de Resumen de Resultados del Ensayo de Pista, de los diferentes tipos de mezclas asfálticas. Se puede ver que los resultados se muestran en Tiempo vs. Incremento en la Deformación, con esto se podrá evaluar la rapidez con la que las mezclas se deforman y el grado de severidad en las deformaciones plásticas.

Resultados del Ensayo de Pista para la mezcla asfáltica en caliente elaborada con la granulometría de la Curva Media o Ajustada, Densa 19mm y con Asfalto Convencional AC-20 y dotaciones de asfalto de (5%, 6%, 7%), con una carga por Eje Equivalente de 13 Toneladas o presión de contacto de $9 \pm 0.25 \text{ kgf/cm}^2$.

Tabla 8.9 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con AC-20, (5%)

Asfalto Convencional AC-20 Prueba 1 CA 5% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Convencional AC-20 Prueba 2 CA 5% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.33	1	0.20
3	0.46	3	0.36
5	0.51	5	0.43
10	0.57	10	0.51
15	0.58	15	0.56
20	0.60	20	0.61
25	0.62	25	0.66
30	0.63	30	0.67
35	0.64	35	0.69
40	0.64	40	0.71
45	0.65	45	0.74
60	0.68	60	0.75
75	0.72	75	0.91
90	0.73	90	0.92
105	0.73	105	1.00
120	0.76	120	1.02

Tabla 8.10 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con AC-20, (6%)

Asfalto Convencional AC-20 Prueba 1 CA 6% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Convencional AC-20 Prueba 2 CA 6% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.15	1	0.38
3	0.36	3	0.58
5	0.48	5	0.65
10	0.67	10	0.76
15	0.79	15	0.84
20	0.86	20	0.91
25	0.94	25	0.98
30	1.02	30	1.04
35	1.08	35	1.07
40	1.13	40	1.16
45	1.17	45	1.20
60	1.32	60	1.44
75	1.45	75	1.63
90	1.52	90	1.79
105	1.68	105	1.88
120	1.73	120	1.96

Tabla 8.11 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con AC-20, (7%)

Asfalto Convencional AC-20 Prueba 1 CA 7% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Convencional AC-20 Prueba 2 CA 7% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.38	1	0.25
3	0.56	3	0.48
5	0.69	5	0.61
10	0.81	10	0.79
15	0.91	15	0.86
20	0.99	20	0.97
25	1.02	25	1.04
30	1.07	30	1.09
35	1.12	35	1.10
40	1.17	40	1.17
45	1.18	45	1.21
60	1.23	60	1.30
75	1.37	75	1.37
90	1.38	90	1.42
105	1.42	105	1.47
120	1.47	120	1.55

Como se puede observar se realizaron 6 pruebas de máquina de pista para las mezclas realizadas con asfalto convencional AC-20, ya que son dos pruebas por cada porcentaje (%) de asfalto, y como se puede observar hay variaciones de acuerdo al porcentaje de asfalto empleado, dichas variaciones que se discutirán en sus respectivas figuras.

Resultados del Ensayo de Pista para la mezcla asfáltica en caliente elaborada con la granulometría de la Curva Media o Ajustada, Densa 19mm y con Asfalto Modificado PG-82 y dotaciones de asfalto de (5%, 6%, 7%), con una carga por Eje Equivalente de 13 Toneladas o presión de contacto de $9 \pm 0.25 \text{ Kg/cm}^2$.

Tabla 8.12 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con Asfalto Modificado PG-82, (5%)

Asfalto Modificado PG-82 Prueba 1 CA 5% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Modificado PG-82 Prueba 2 CA 5% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.10	1	0.05
3	0.18	3	0.06
5	0.25	5	0.07
10	0.26	10	0.08
15	0.33	15	0.09
20	0.34	20	0.10
25	0.34	25	0.13
30	0.35	30	0.15
35	0.38	35	0.18
40	0.38	40	0.20
45	0.40	45	0.24
60	0.44	60	0.33
75	0.47	75	0.38
90	0.48	90	0.43
105	0.50	105	0.47
120	0.53	120	0.51

Tabla 8.13 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con Asfalto Modificado PG-82, (6%)

Asfalto Modificado PG-82 Prueba 1 CA 6% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Modificado PG-82 Prueba 2 CA 6% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.05	1	0.09
3	0.14	3	0.10
5	0.18	5	0.13
10	0.25	10	0.13
15	0.32	15	0.15
20	0.36	20	0.15
25	0.41	25	0.17
30	0.44	30	0.18
35	0.45	35	0.19
40	0.47	40	0.19
45	0.51	45	0.20
60	0.56	60	0.20
75	0.60	75	0.22
90	0.63	90	0.23
105	0.66	105	0.23
120	0.71	120	0.24

Tabla 8.14 Resultados del Ensayo de Pista, Mezcla con Asfalto Modificado PG-82, (7%)

Asfalto Modificado PG-82 Prueba 1 CA 7% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.		Asfalto Modificado PG-82 Prueba 2 CA 7% Curva Media ó Ajustada Eje equivalente de 13 Toneladas.	
Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (minutos)	Incremento de la Deformación Acumulada (mm)
0	0.00	0	0.00
1	0.15	1	0.10
3	0.21	3	0.22
5	0.23	5	0.29
10	0.31	10	0.43
15	0.38	15	0.54
20	0.41	20	0.64
25	0.47	25	0.74
30	0.51	30	0.80
35	0.54	35	0.86
40	0.57	40	0.94
45	0.60	45	1.02
60	0.69	60	1.16
75	0.74	75	1.21
90	0.81	90	1.27
105	0.85	105	1.30
120	0.90	120	1.34

Como se puede observar al igual que para el Asfalto Convencional también se realizaron 6 pruebas para las Mezclas realizadas con el Asfalto Modificado PG-82, en las cuales también se nota una variación de deformación de acuerdo a sus contenidos de Asfalto Modificado PG-82, variación que se discutirá respectivamente en sus correspondientes figuras.

A continuación se muestran las figuras de Resultados del Ensayo de Pista, de los diferentes tipos de mezclas asfálticas. Se puede ver que los resultados se muestran en Tiempo vs. Incremento en la Deformación, con esto se podrá evaluar la rapidez con la que la mezclas se deforman y el grado de severidad en las deformaciones plásticas.

Ensayo de Pista para la mezcla asfáltica en caliente elaborada con la granulometría de la Curva Media o Ajustada, Densa 19mm y con Asfalto Convencional AC-20 y Asfalto

Modificado PG-82, con dotaciones de asfalto de (5%, 6%, 7%), con una carga por Eje Equivalente de 13 Toneladas o presión de contacto de 9 ± 0.25 Kg/cm².

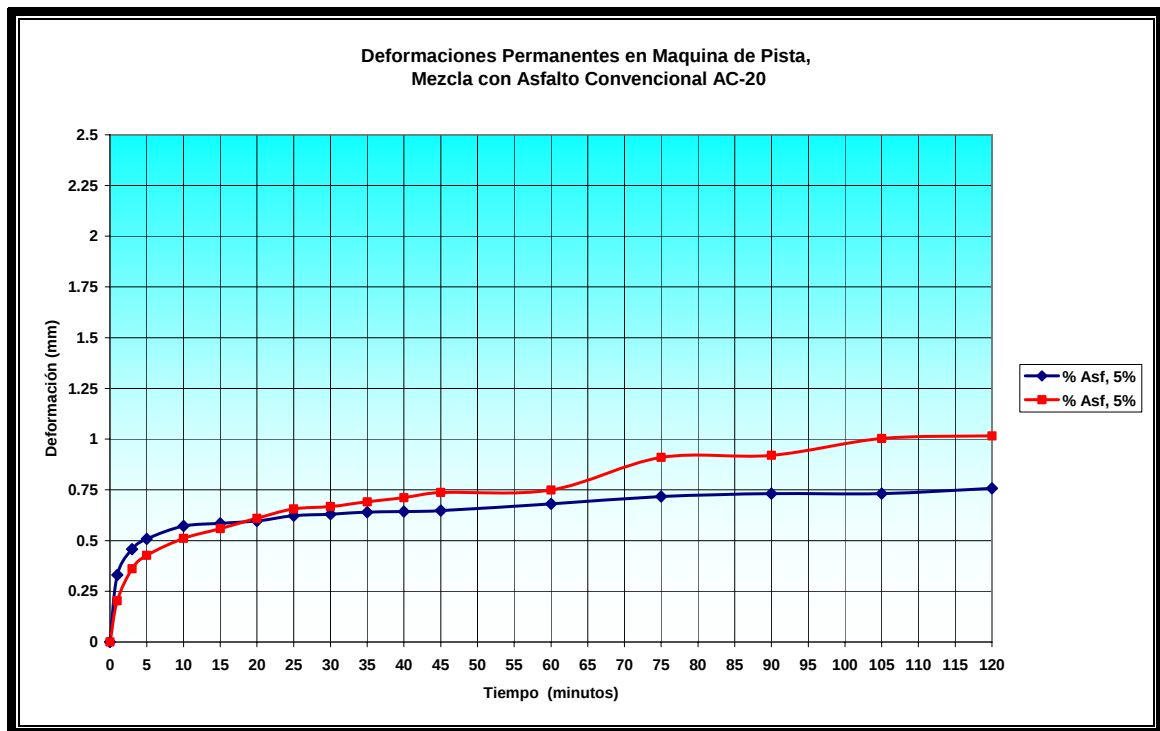


Figura 8.7 Ensayo de Pista, Asfalto Convencional AC-20, 5%.

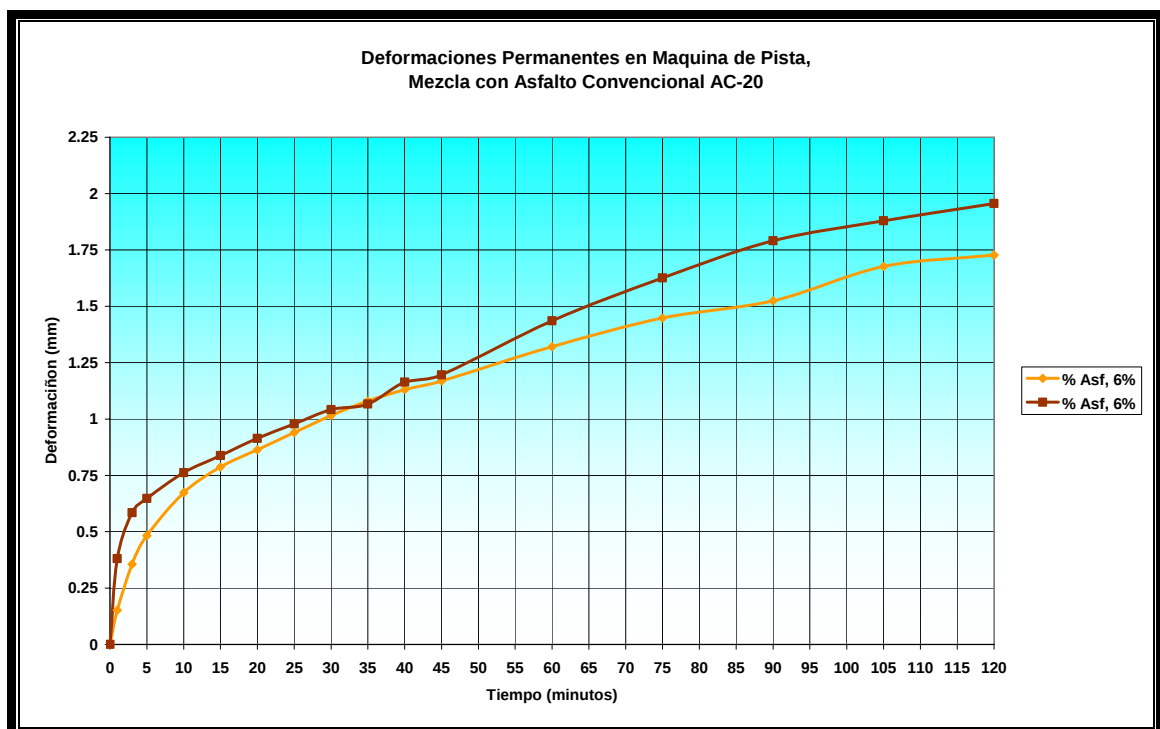


Figura 8.8 Ensayo de Pista, Asfalto Convencional AC-20, 6%.

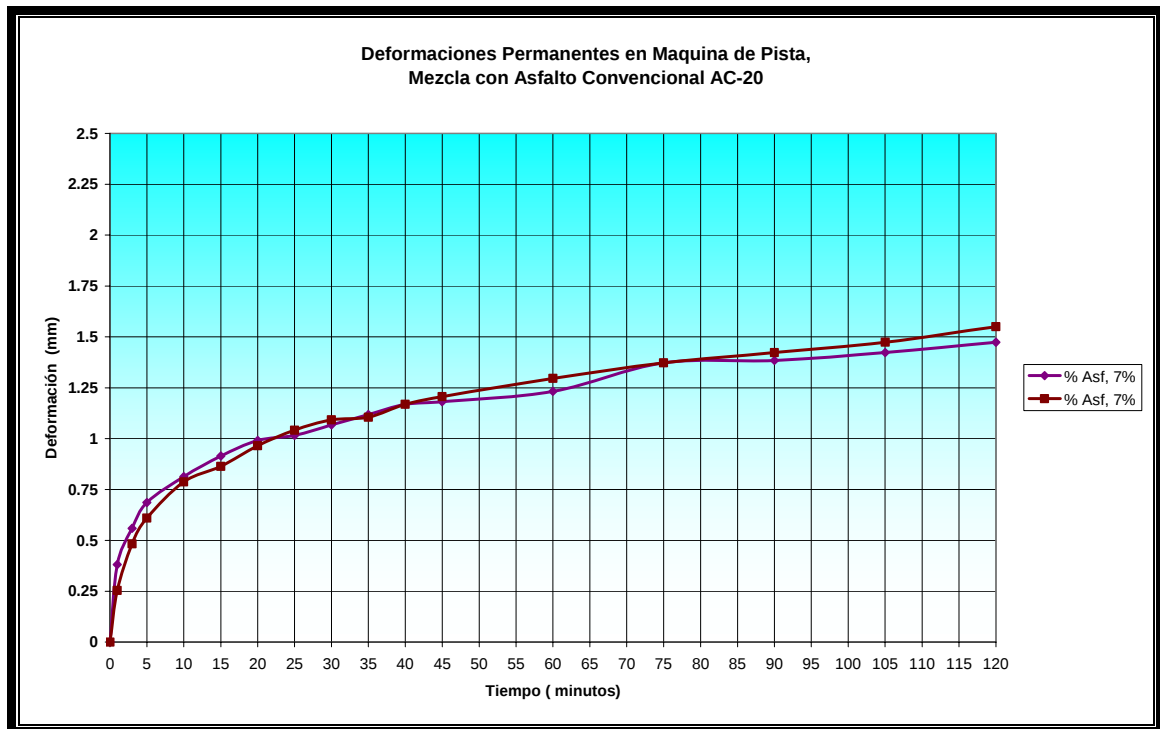


Figura 8.9 Ensayo en de Pista, Asfalto Convencional AC-20, 7%.

Como se puede observar en las figuras (8.7, 8.8 y 8.9) de la prueba de Pista realizadas con diferentes porcentajes (5%,6%,7%) de Asfalto convencional AC-20, se obtuvieron comportamientos similares para cada figura, ya que cada una de estas, figuras contiene 2 pruebas con el mismo porcentaje de asfalto, y dicho esto se puede observar que no hubo mucha variación en las respectivas figuras, donde se observa una mayor variación fue en las pruebas realizadas con el contenido de Asfalto de 6%.

Una observación importante es el papel que juega el factor temperatura, como el control se realizó manualmente debido a fallas técnicas del equipo (termopar), se observó que con poco que aumentara la temperatura, era muy notable la deformación en ese periodo, cuestión que probablemente haya afectado a dicha prueba.

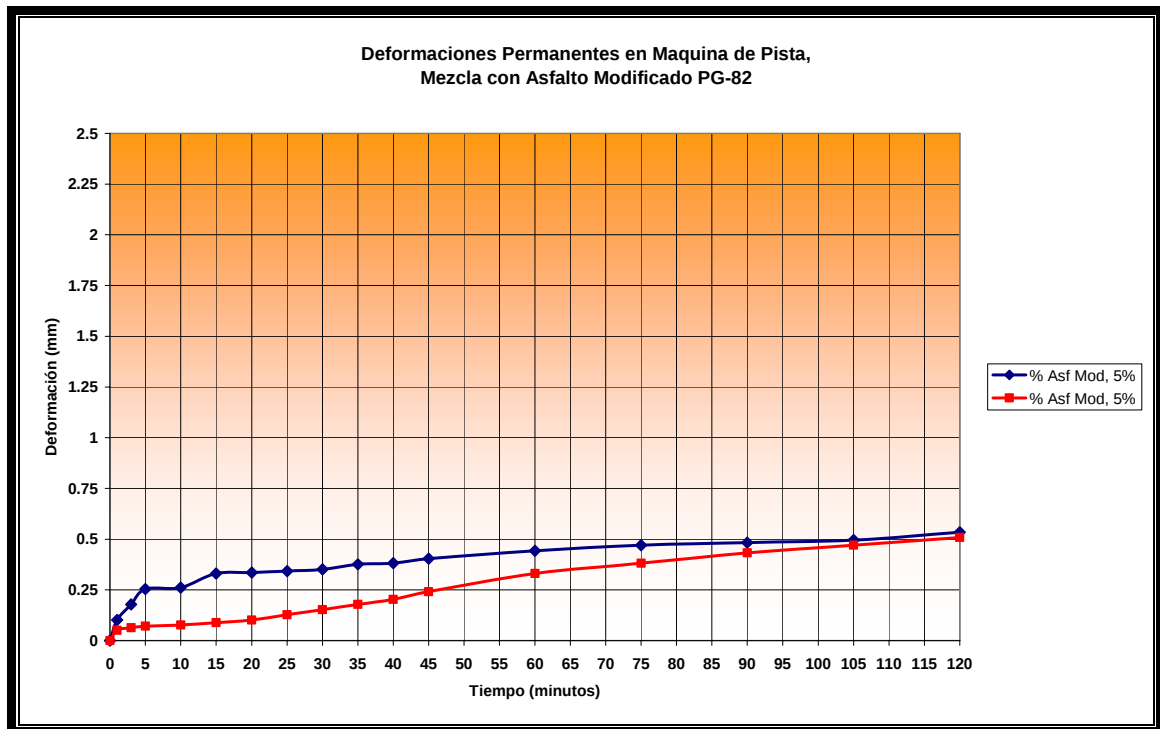


Figura 8.10 Ensayo de Pista, Asfalto Modificado PG-82, 5%.

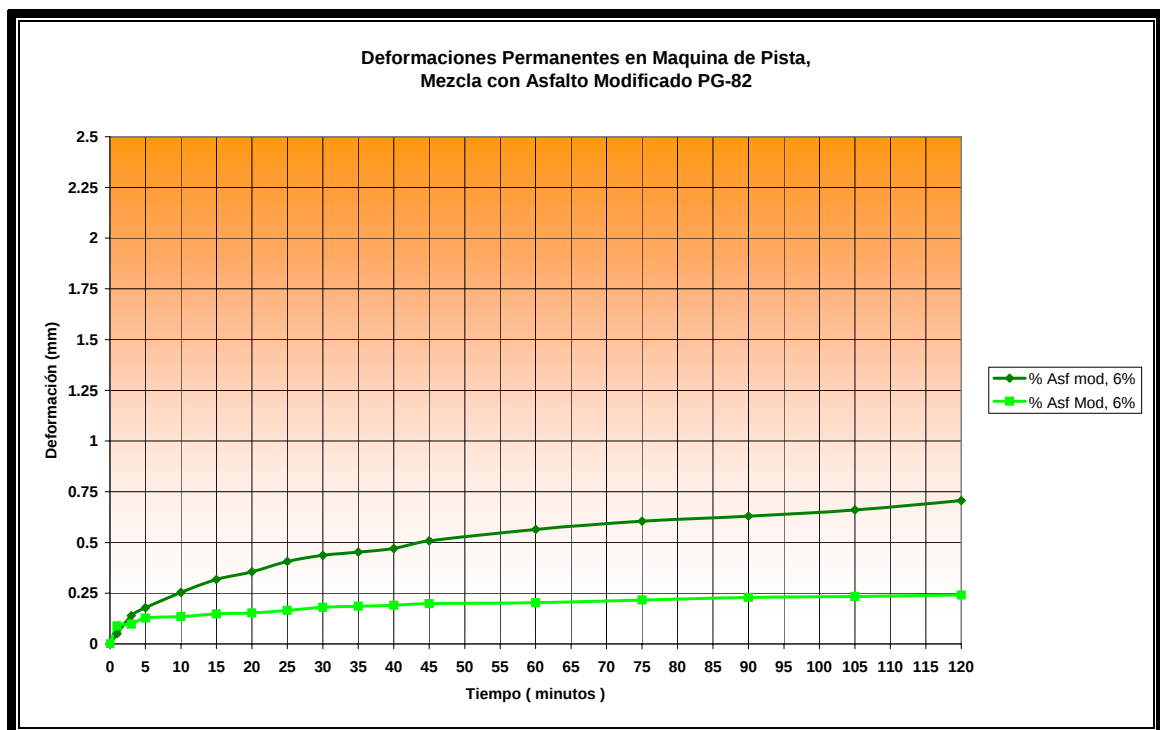


Figura 8.11 Ensayo de Pista, Asfalto Modificado PG-82, 6%.

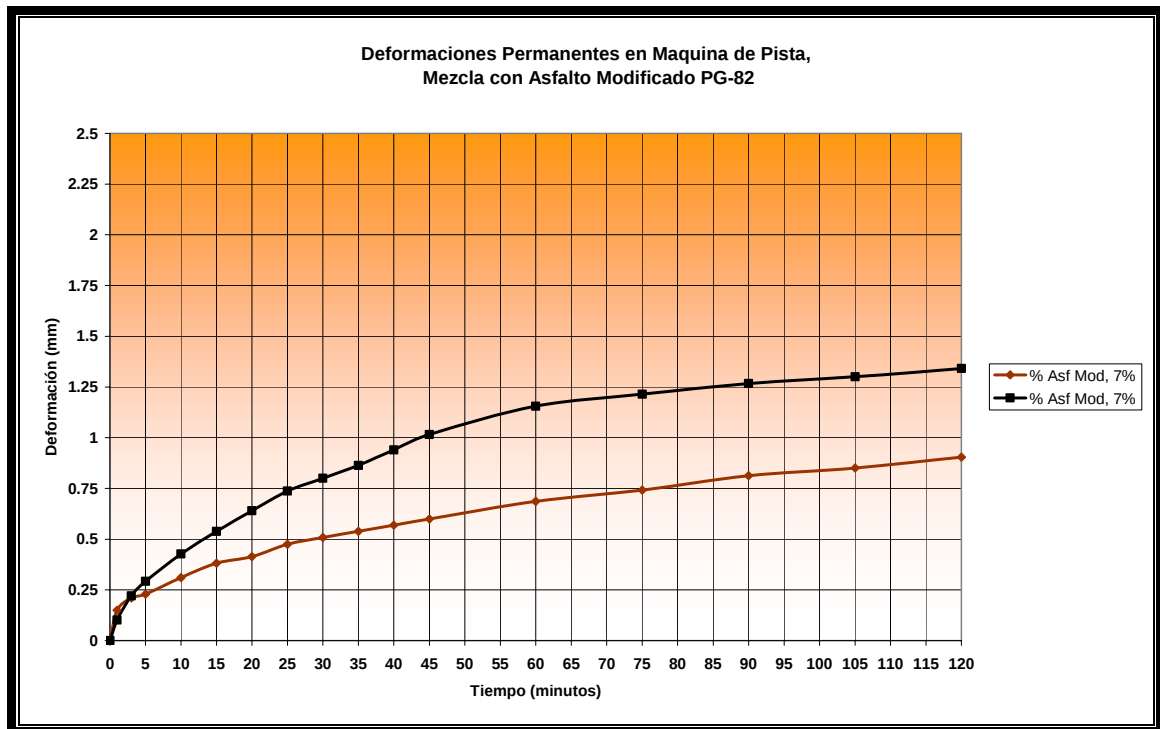


Figura 8.12 Ensayo de Pista, Asfalto Modificado PG-82, 7%.

Es evidente también las variaciones en cuestión de deformación para las pruebas realizadas con Asfalto Modificado como podemos observar en las figuras 8.10, 8.11 y 8.12 y respectivamente con contenidos de asfalto modificado de 5%, 6% y 7%.

Como ya se mencionó el papel tan importante que juega la temperatura dentro del ensayo, se observó que aun es mas notorio este factor para las mezclas realizadas con el Asfalto modificado, y como se puede observar en las figuras es mas notorio.

Pero en estas pruebas la diferencia más notoria se observó para la prueba del porcentaje de asfalto modificado del 6%, ya que en una de estas pruebas se obtuvieron resultados muy bajos, posiblemente debido a un mal funcionamiento del micrómetro, debido a que se tubo que adaptar un micrómetro para las condiciones de la prueba.

En términos generales se puede hablar de una muy buena realización de pruebas ya que también es evidente que las mezclas con asfalto convencional AC-20 sufrieron más deformación que las pruebas realizadas con mezclas donde utilizamos el Asfalto Modificado PG-82.

A continuación se realizó el cálculo de la velocidad de deformación para el intervalo que se evalúa en la normativa (intervalo de 105 a 120 minutos) con la ecuación contenida en la Normativa NLT-173/800, para todas las probetas de mezcla asfáltica elaborada a partir de la curva granulométrica Media, y con los dos tipos de Asfalto, el Convencional AC-20 y el Modificado PG-82 y las condiciones de carga por Eje Equivalente 13 Toneladas (Normativa Española), los valores de cada uno de los parámetros se tomaron de las tablas de las pruebas de Máquinas de pistas vistas anteriormente.

$$V_{t_2}/V_{t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{0.53mm - 0.50mm}{120 \text{ min} - 105 \text{ min}} = \frac{0.03mm}{15 \text{ min}} = 0.002 \text{ mm/min}$$

$$V_{t_2}/V_{t_1} = 0.002 \text{ mm/min} \times 60 \text{ minutos} = 0.12 \text{ mm/hora}$$

$$V_{t_2}/V_{t_1} = \text{Velocidad de deformación en el intervalo 105 min. a 120 min.}$$

t_2 = Tiempo en el Ensayo de Pista 120 min.

t_1 = Tiempo en el Ensayo de Pista 105 min.

d_{t_2} = Lectura de Deformación en el Tiempo t_2

d_{t_1} = Lectura de Deformación en el Tiempo t_1

A continuación se muestran las Figuras de Velocidad de Deformación para el intervalo de tiempo de (105 a 120 minutos) realizadas para cada tipo de asfalto utilizado en las mezclas (Asfalto Convencional AC-20, y Asfalto Modificado PG-82).

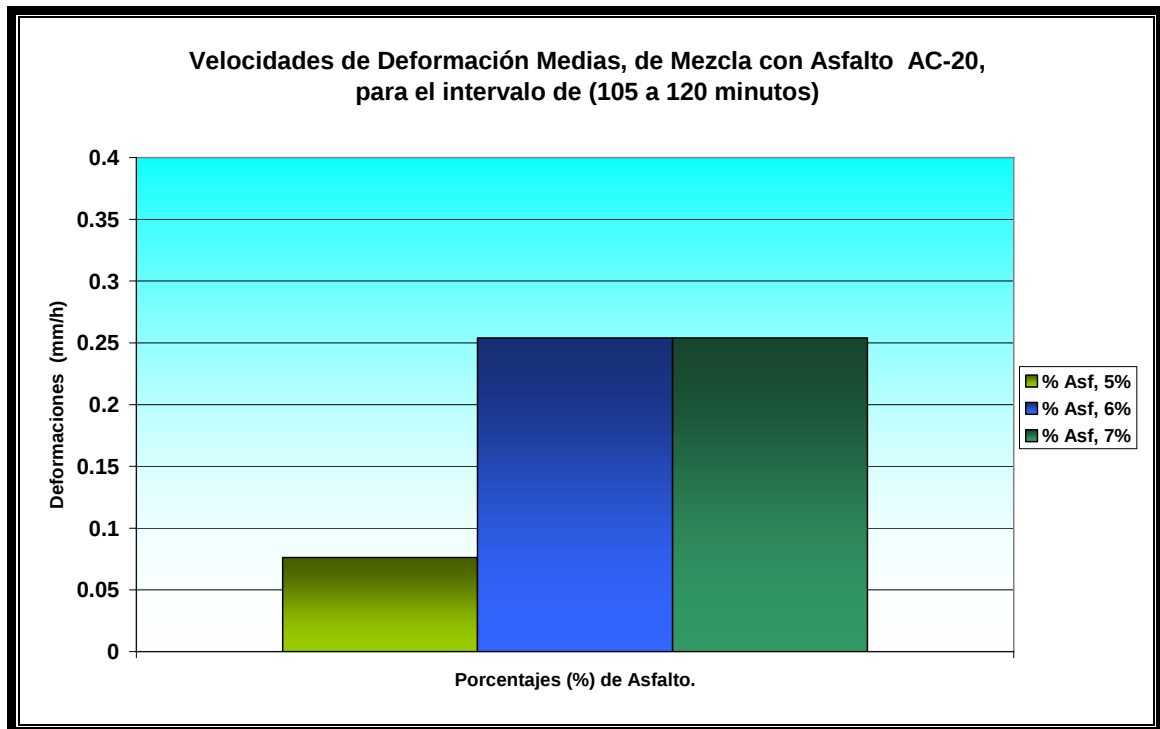


Figura 8.13 Velocidades de Deformación Medias, Asfalto Convencional AC-20, (5%,6% y 7%).

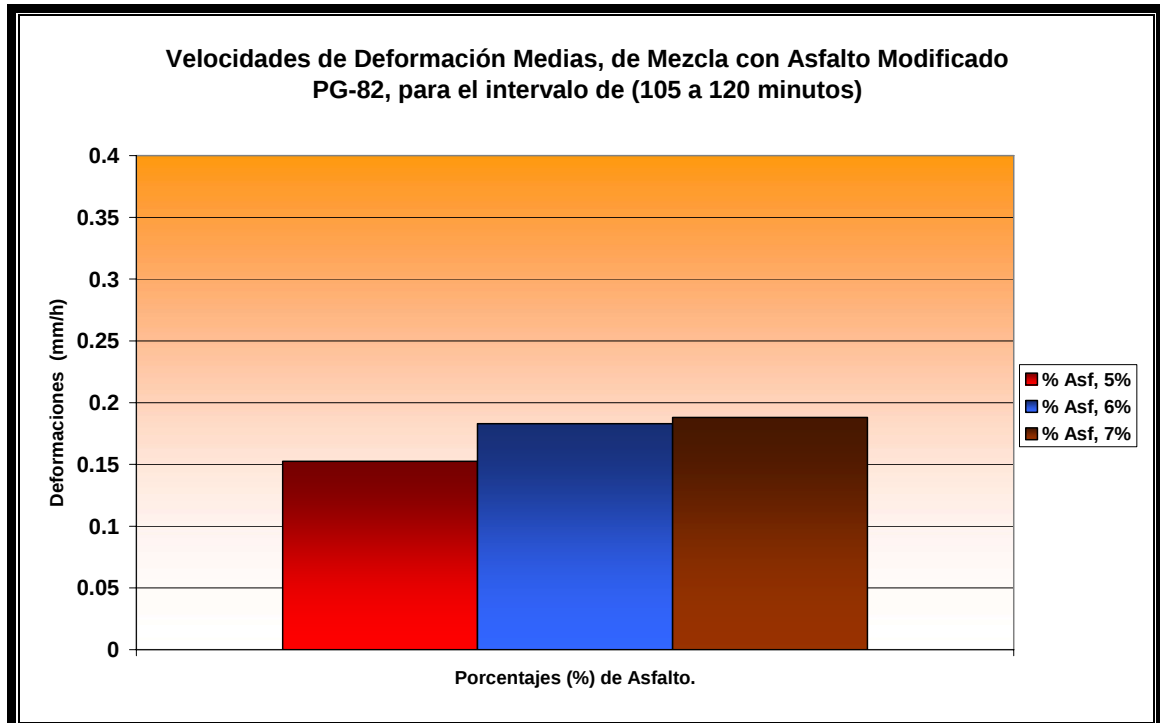


Figura 8.14 Velocidades de Deformación Medias, Asfalto Modificado PG-82, (5%,6% y 7%).

Como se puede observar en las figuras de Velocidades de Deformación se considera solo el intervalo de tiempo de 105 a 120 minutos, ya que es el intervalo que la Normativa (NTL-173/00) marca para su evaluación, en la figura 8.13 tenemos las velocidades de deformación medias para las mezclas realizadas con el asfalto convencional AC-20, en dicha figura podemos observar como la velocidad de deformación para los porcentajes de 6% Y 7% es igual y para 5% es menor que las dos anteriores, en cierta forma un comportamiento razonable por el porcentaje de asfalto.

Para la figura 8.14 de velocidades de deformación medias en las mezclas realizadas con asfalto modificado PG-82, tenemos también una variación de cada una de las mezclas de acuerdo al porcentaje de Asfalto utilizado, y aquí podemos notar que a mayor porcentaje de asfalto la velocidad de deformación también aumenta, aun que para las pruebas con el porcentajes del 6% y 7% es mínima pero notoria.

CONCLUSIONES.

Como se ha dicho las deformaciones plásticas, hoy en día en nuestro entorno son un problema a considerar, y su estudio es de mucha importancia, en el presente trabajo se observaron los diferentes factores que intervienen en su formación, factores que se deben considerar al momento de diseñar y ejecutar, pavimentos asfálticos.

En el presente trabajo se puede concluir que la presencia de deformaciones plásticas en las capas de rodadura de un pavimento flexible intervienen una serie de factores, tales como cemento asfáltico, granulometría del material, temperatura de la prueba, y carga en eje equivalente, solo que en este trabajo se enfocó mas a el factor “cemento asfáltico” que fue el parámetro que se varió en las mezclas asfálticas, ya que se utilizó una misma granulometría para las mezclas, las pruebas se realizaron a una misma temperatura, la carga de eje equivalente fue la misma para todas las pruebas.

Como ya se mencionó se utilizaron dos tipos de asfalto, un asfalto convencional AC-20 y un asfalto modificado PG-82, y en cada uno con 3 diferentes tipos de porcentajes (5%,6% y 7%) para la elaboración de las mezclas.

Para las mezclas elaboradas con asfalto convencional AC-20, en general se obtuvo un comportamiento bueno ya que las deformaciones presentadas fueron bajas, comparando los porcentajes utilizados en estas mezclas, se obtuvieron las mayores deformaciones en las pruebas realizadas con el porcentaje de asfalto del 6%, como ya se dijo el factor

temperatura es de gran importancia, pese a que no es el factor temperatura una variación en el ensayo, por que como ya se mencionó todas las pruebas se realizaron a una temperatura constante (60°C), una observación fue el control de la temperatura, ya que se realizó manualmente, por fallas técnicas del termopar de la máquina, y esto a su vez provocó que en ocasiones la temperatura estuviera en un rango de $\pm 2^\circ\text{C}$, y era notable que existía un aumento de deformación, claro dentro del rango de las deformaciones que se obtuvieron.

Por otro lado la velocidad de deformación media para las mezclas elaboradas con asfalto convencional AC-20, y para el intervalo de 105-120 minutos, ya que es el parámetro que nos fija la normativa española (PG-3) para su evaluación, resulto ser bajo para los 3 porcentajes de asfalto y cumpliendo con los requisitos de la normativa.

Para las mezclas elaboradas con asfalto modificado PG-82, su comportamiento de las mezclas a las deformaciones permanentes fue mejor que el las mezclas elaboradas con el asfalto convencional, ya que fueron aun mas bajas, y comparando los diferentes tipos de porcentaje utilizados, se tiene que a mayor porcentaje de asfalto fue mayor la deformación, a un que con muy poca diferencia entre las elaboras con el 6% y 7% de asfalto.

La velocidad de deformación media para las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado PG-82, fue muy buena ya que esta por abajo que la que obtuvieron las mezclas elaboradas con el asfalto convencional, y por lo tanto se cumple con las especificaciones de velocidad de deformación que especifica la norma española (el PG-3)..

Sin duda alguna el comportamiento de las mezclas elaboradas con el Asfalto Modificado PG-82, fue mejor que el de las mezclas elaboras con el Asfalto Convencional AC-20.

BIBLIOGRAFÍA.

Alarcón Ibarra J. (2003). “Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta”. Tesis doctoral. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. U.P.C. Barcelona España.

Angelone S. et al. (2006). “Deformaciones Permanentes de Mezclas Asfálticas”. Reporte Técnico RT-ID-06/02. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Brown S. F. and P. S. Pell (1974). “Repeated Loading of Bituminous Materials”. CAPSA 74. National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban.

Cooper K. E., S. F. Brown and G. R. Pooley (1985). “The Design of Aggregate Gradings for Asphalt Basecourses”. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54.

Corté J. F. et al (1994). “Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration”. Transportation Research Record No. 1436.

Fonseca Rodríguez, C. H. y Seremet Guerrero, V. A., (2001), “Estudio Experimental en Laboratorio para Evaluar la Resistencia a la Deformación Plástica de Diferentes Tipos de Mezclas Asfálticas en Caliente, Elaboradas con Materiales Típicos de la Zona Noreste de México, Mediante Ensayos en Máquina de Pista (Wheel Tracking)”, Publicado y presentado en el 11 Congreso Iberoamericano del Asfalto. Asociación Peruana de Carreteras. Lima, Perú.

Fonseca Rodríguez, C. H., (2000), “Estudio de Deformaciones Plásticas Permanentes (Rutting) en Mezclas Asfálticas Elaboradas con Materiales de la Zona Noreste de México Mediante la Máquina de Pista (Wheel Tracking)”. XXX Congreso de Investigación y Extensión del Sistema ITESM, ITESM, Campus Monterrey. Enero. pp. 193-202. México.

Garnica Anguas P. et al .(2005). “Análisis Comparativo de los Métodos de Marshall y SUPERPAVE para Compactación de Mezclas Asfálticas.” Publicación Técnica No. 271. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sanfandila, Querétaro.

Garnica Anguas P. et al .(2005). “Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.” Publicación Técnica No. 267. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sanfandila, Querétaro.

Garnica Anguas P y Correa A.(2004). “Conceptos Mecanicistas en Pavimentos.” Publicación Técnica No. 258. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sanfandila, Querétaro.

Harvey J. and Monismith (1993). “Effect of Asphalt Concrete Specimen Preparation Variables on Fatigue and Permanent Deformation Test Results Using Strategic Highway Research Program A-003A Proposed Testing Equipment”. Transportation Research Record No. 1417.

Huang Yang H. (1993). “Pavement Analysis and Design”. University of Kentucky. Prentice Hall, inc. U.S.A.

Kandhal P. S. and Mallick R. B. (2001). “Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense – Graded Asphalt Mixtures”. Transportation Research Record No. 1767.

Kamel N. I. and Miller L. J. (1994). “Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts”. Transportation Research Record No. 1454.

Mahboub K, and D.N. L Little (1988). “Improved Asphalt Concrete Design Procedure”. Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute

Monismith C. L., et al.(1994). “Permanent Deformation Response of Asphalt – Aggregate Mixes”. SHRP-A-415. National Research Council. Washington, D.C. U.S.A.

Monismith C. L. and A. A. Tayebali (1988). Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, Virginia, Vol. 57.

Norma NLT173/84.”Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”.

Nosetti A. et al. (2005). “Estudios Comparativos de Microaglomerados discontinuos y Stone Mastic Asphalt (SMA). 1ra. Parte. Resistencia al Ahuellamiento. Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial, (LaPIV). Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

Padilla Rodríguez A. (2004). “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de máquina de pista”. Tesis de Postgrado. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. ETSECCPB. U.P.C. Barcelona, España.

Rico Rodríguez A. et al. (1998). “Pavimentos Flexibles, Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias.” Publicación Técnica No. 104. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sanfandila, Querétaro.

Stuartk. D. (1993). “Asphalt Mixtures Containing Chemically Modified Binders”. Transportation Research Record. No. 1417.

Uge P. and P.J. Van de Loo. (1974). “Permanent Deformation of Asphalt Mixes”. Koninklijke/Shell-Laboratorium, Ámsterdam, November 1974.

