



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

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

TESIS

**Como requisito parcial para obtener
El título profesional de**

INGENIERO CIVIL

Presenta:

ADRIÁN ZACARÍAS GARCÍA

Director:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

Morelia Mich. Abril del 2008

ÍNDICE

	Pág.
Introducción.	6
Objetivos.....	11
CAPÍTULO 1.	
Pavimentos Asfálticos.....	12
CAPÍTULO 2.	
Material es utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas.....	14
2.1 Agregados pétreos.....	14
◇ 2.1.1 Definición de agregados pétreos	14
◇ 2.1.2 Tipos de agregados pétreos	14
◇ 2.1.3 Propiedades de los agregados pétreos.....	15
◇ 2.1.4 Granulometría.....	15
2.2 Cementos Asfálticos.....	17
◇ 2.2.1 Generalidades de los asfaltos.....	17
◇ 2.2.2 Definición de asfaltos.....	18
◇ 2.2.3 Composición y estructura de los cementos asfálticos.....	18
◇ 2.2.4 Clasificación y terminología de los cementos asfálticos.....	20
◇ 2.2.5 Propiedades de los cementos asfálticos.....	24
◇ 2.2.6 Asfaltos modificados.....	29
CAPÍTULO 3.	
Mezclas Asfálticas.....	43
3.1 Empleo de las mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos.....	43
3.2 Funcionalidad de las mezclas asfálticas en los pavimentos.....	43
3.3 Definición y clasificación.....	47
◇ 3.3.1 Mezclas asfálticas en caliente.....	47
◇ 3.3.2 Mezclas asfálticas en frío.....	47
◇ 3.3.3 Mezclas asfálticas por el sistema de riego.....	48
CAPÍTULO 4.	
Método de diseño para la mezcla asfáltica.....	49
4.1 Método Marshall.....	49

CAPÍTULO 5.	Pág.
Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos.....	54
5.1 Definición de deformación plástica.....	54
5.2 Tipos de deformaciones plásticas (Roderas).....	55
◇ 5.2.1 Roderas por fallas en la Subrasante	55
◇ 5.2.2 Roderas por fallas en la capa de asfalto.....	56
5.3 Mecanismos de formación de roderas.....	57
◇ 5.3.1 Solicitaciones de cargas a un pavimento.....	60
5.4 Factores que intervienen en la formación de roderas.....	61
CAPÍTULO 6.	
Descripción de la prueba.....	70
6.1 Equipos para Ensayos de Rueda cargada o Wheel-Tracking Tests.....	70
6.2 Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.....	71
◇ 6.2.1 Descripción del equipo.....	71
6.3 Fabricación de las probetas.....	75
6.4 Descripción de la prueba.....	76
◇ 6.4.1 Temperatura de ensayo.....	76
◇ 6.4.2 Presión de contacto de la rueda.....	76
◇ 6.4.3 Ejecución del ensayo.....	76
6.5 Obtención de los resultados.....	77
CAPÍTULO 7.	
Ensayos de laboratorio.....	79
7.1 Secado del material.....	79
7.2 Granulometría.....	79
7.3 Preparación del material.....	81
7.4 Fabricación de las probetas.....	82
7.5 Pruebas en la máquina de pista.....	85
7.6 Obtención de resultados.....	86
CAPÍTULO 8.	
Resultados y comportamientos de las mezclas asfálticas.....	87
8.1 Consideraciones granulométricas del material pétreo.....	87
8.2 Propiedades físicas del asfalto AC-20.....	89
8.3 Dosificación del aditivo y los polímeros.....	89
8.4 Ensayo de pista.....	92

	Pág.
CONCLUSIONES.....	108
BIBLIOGRAFÍA.	110

A MIS PADRES....

Por haberme dado la vida, por inculcarme esos grandes valores, por enseñarme a crecer, por todo su apoyo incondicional que siempre me han brindado en los buenos y malos momentos, porque siempre que los he necesitado han estado ahí, por todas esas limitaciones que tuvieron que pasar para poder darme un futuro mejor, por haberme heredado esta gran herencia que es la educación, por todo esto y mucho más.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada gracias a Dios y a la virgen de Guadalupe, por la maravillosa vida que nos dieron a todos, por la ayuda espiritual que incondicionalmente siempre nos dan y por esos grandes logros que con su ayuda han sido posibles.

A mi Padre, por el ejemplo de vida que siempre me ha dado, por enseñarme a ser honrado, humilde, por inculcarme el esfuerzo que día a día debo hacer para lograr mis metas, por apoyarme siempre en todas mis desiciones, por creer y confiar en mí, gracias.

A mi Madre, por su gran amor, sus consejos, su comprensión, por todos los desvelos que ha pasado siempre pensando en mi bienestar, por creer y confiar en mí, por mencionar siempre las palabras correctas, esas que me impulsan a seguir adelante, gracias.

A mis hermanos, por el gran cariño que siempre me han dado, por su apoyo incondicional, por compartir con migo todos esos grandes momentos, y porque más que mis hermanos, han sido para mí unos grandes amigos.

A Leticia, por su amor, su compañía, su comprensión, porque siempre ha estado ahí para celebrar con migo mis triunfos y acompañarme en mis fracasos, por apoyarme siempre y entender mis desiciones.

A mis amigos, por su gran amistad y porque siempre me impulsaron a seguir adelante, no mencionaré nombres por miedo a que me pudiera faltar alguno, pero ellos saben muy bien quien son y saben además el gran agradecimiento que les tengo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por darnos la oportunidad de ser alguien en la vida.

A la Facultad de Ingeniería Civil, por la educación, por habernos alojado durante nuestro periodo de formación y de igual forma por los grandes momentos que en ella pasamos.

A los Profesores de la Facultad, por sus grandes enseñanzas, por compartir sus experiencias con nosotros y por los consejos que nos dieron, los cuales nos ayudaran en nuestra vida profesional.

A mi Director de Tesis, Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por haberme apoyado con la realización de este trabajo, por todos sus consejos, por el tiempo que dedico para poder hacer posible la elaboración de esta tesis, por su gran enseñanza, por compartir con todos sus alumnos su conocimiento y por la gran amistad que siempre me brindo.

Al I.Q. Raymundo Benítez López, por su gran colaboración y apoyo que me brindó con los materiales, los cuales fueron la materia prima para la elaboración de este trabajo.

INTRODUCCIÓN.



Fig.1 Primeros caminos construidos (Vía Apia)

Generalidades.

Desde la antigüedad, la construcción de carreteras ha sido uno de los primeros signos de civilización avanzada. Cuando las ciudades de las primeras civilizaciones empezaron a aumentar de tamaño y densidad de población, la comunicación con otras regiones se tornó necesaria para hacer llegar suministros alimenticios o transportarlos a otros consumidores. Entre los primeros constructores de carreteras se encuentran los mesopotámicos, hacia el año 3500 a.C.; los chinos, que construyeron la Ruta de la Seda (la más larga del mundo) durante 2.000 años, y desarrollaron un sistema de carreteras en torno al siglo XI a.C., y los incas de Sudamérica, que construyeron una avanzada red de caminos que no pueden ser considerados estrictamente carreteras, ya que los incas no conocían la rueda. Esta red se distribuía por todos los Andes e incluía galerías cortadas en rocas sólidas. En el siglo I, el geógrafo griego Estrabón registró un sistema de carreteras que partían de la

antigua Babilonia; los escritos de Heródoto, historiador griego del siglo V a.C., mencionan las vías construidas en Egipto para transportar los materiales con los que construyeron las pirámides y otras estructuras monumentales levantadas por los faraones.

De las carreteras aún existentes, las más antiguas fueron construidas por los romanos. La vía Apia empezó a construirse alrededor del 312 a.C., y la vía Faminia hacia el 220 a.C. En la cumbre de su poder, el Imperio romano tenía un sistema de carreteras de unos 80.000 km, consistentes en 29 calzadas que partían de la ciudad de Roma, y una red que cubría todas las provincias conquistadas importantes, incluyendo Gran Bretaña. Las calzadas romanas tenían un espesor de 90 a 120 cm, y estaban compuestas por tres capas de piedras argamasadas cada vez más finas, con una capa de bloques de piedras encajadas en la parte superior. Según la ley romana toda persona tenía derecho a usar las calzadas, pero los responsables del mantenimiento eran los habitantes del distrito por el que pasaba. Este sistema era eficaz para mantener las calzadas en buen estado mientras existiera una autoridad central que lo impusiera; durante la edad media (del siglo X al XV), con la ausencia de la autoridad central del Imperio romano, el sistema de calzadas nacionales empezó a desaparecer.

A mitad del siglo XVII, el gobierno francés instituyó un sistema para reforzar el trabajo local en las carreteras, y con este método construyó aproximadamente 24.000 Km. de carreteras principales. Más o menos al mismo tiempo, el Parlamento instituyó un sistema de conceder franquicias a compañías privadas para el mantenimiento de las carreteras, permitiendo a las compañías que cobraran un peaje o cuotas por el uso de las mismas.

Durante las tres primeras décadas del siglo XIX, dos ingenieros británicos, Thomas Telford y John Loudon McAdam, y un ingeniero de caminos francés, Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet, perfeccionaron los métodos y técnicas de construcción de carreteras. El sistema de Telford implicaba cavar una zanja e instalar cimientos de roca pesada. Los cimientos se levantaban en el centro para que la carretera se inclinara hacia los bordes permitiendo el desagüe. La parte superior de la carretera consistía en una capa de 15 cm. de piedra quebrada compacta.

McAdam mantenía que la tierra bien drenada soportaría cualquier carga. En el método de construcción de carreteras de McAdam, la capa final de piedra quebrada se colocaba directamente sobre un cimiento de tierra que se elevaba

del terreno circundante para asegurarse de que el cimientto desaguaba. El sistema de McAdam, llamado macadamización, se adoptó en casi todas partes, sobre todo en Europa. Sin embargo, los cimientos de tierra de las carreteras macadamizadas no pudieron soportar los camiones pesados que se utilizaron en la I Guerra Mundial. Como resultado, para construir carreteras de carga pesada se adoptó el sistema de Telford, ya que proporcionaba una mejor distribución de la carga de la carretera sobre el subsuelo subyacente.

Durante el periodo de expansión del ferrocarril en la última mitad del siglo XIX, el desarrollo de las carreteras sufrió su correspondiente declive. También en este periodo se introdujeron el ladrillo y el asfalto como pavimento para las calles de las ciudades.

Actualidad en nuestro país.

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 todos estos cambios son debidos 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 debidas 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 con Elvaloy, Látex y Aditivo Promotor de Adherencia, 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 del banco “Tonala”.

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 asfaltos modificados con Elvaloy, Látex Butonal 1118 y Aditivo Promotor de Adherencia Quimikao, utilizando la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Objetivos Particulares.

- 1) Observar el comportamiento de cada uno de los 6 tipos de asfaltos utilizados y analizados en la pista de ensayo del Laboratorio UMICH.
- 2) Determinar de los seis tipos de asfaltos utilizados cual tiene mejor comportamiento.
- 3) Observar y analizar la importancia que tiene la temperatura y el efecto del agua en las probetas al momento de someterse a cargas.
- 4) Analizar los resultados obtenidos en todas las pruebas y determinar así cual tipo de asfalto es más eficiente de acuerdo a las condiciones a las cuales fueron sometidas las probetas.

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 grava escoria, grava emulsión, grava ceniza y suelo cemento.

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 que 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 pavimentos 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 influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.1.4 Granulometría.

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

El método de determinación granulométrico más sencillo es obtener las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices. Pero para una medición más exacta se utiliza un granulómetro láser, cuyo rayo difracta en las partículas para poder determinar su tamaño.

Tabla 2.1 Escala Granulométrica

Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0.002 mm
Limos	0.002 – 0.06 mm
Arenas	0.06 – 2 mm
Gravas	2 mm – 6 cm
Cantos Rodados	6 – 25 cm
Bloques	> 25 cm

Clasificación Granulométrica.

Granulometría o clasificación granulométrica es la gradación que de los materiales sedimentarios así como de los suelos, se lleva a cabo con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

Para su realización se utiliza una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una máquina especial.

Luego de algunos minutos, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de los tamices y que en suma deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices (Conservación de la Masa).

Tomando en cuenta el peso total y los pesos retenidos, se procede a realizar la curva granulométrica, con los valores de porcentaje retenido que cada diámetro ha obtenido.

La curva granulométrica permite visualizar la tendencia homogénea o heterogénea que tienen los tamaños de grano (diámetros) de las partículas.

Desde el punto de vista de la Sedimentología, un material heterogéneo se considera mal escogido o seleccionado, mientras que un material homogéneo se considera bien escogido.

Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos, un material heterogéneo se considera bien gradado, y sus propiedades mecánicas ofrecen mayor calidad. Un material homogéneo se considera mal gradado, sus propiedades mecánicas son deficientes.

Curva Granulométrica.

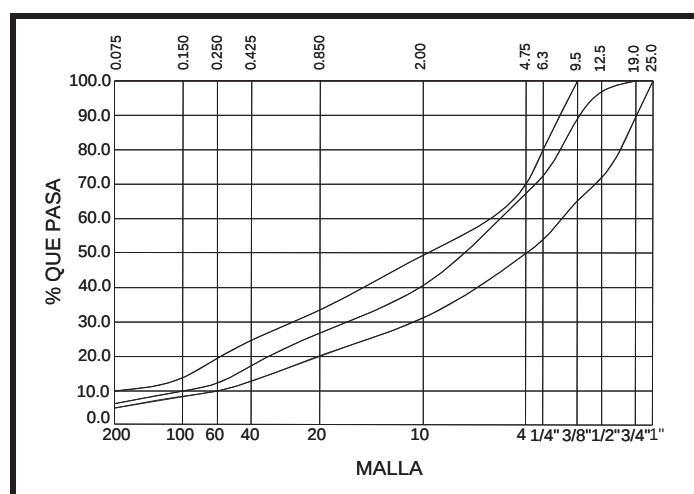


Fig. 2.1 Curva granulométrica

La curva granulométrica de un suelo es una representación gráfica de los resultados obtenidos en un laboratorio cuando se analiza la estructura del suelo desde el punto de vista del tamaño de las partículas que lo forman.

Para este análisis se utilizan dos procedimientos en forma combinada, las partículas mayores se separan por medio de tamices con aberturas de malla estandarizadas, y luego se pesan las cantidades que han sido retenidas en cada tamiz. Las partículas menores se separan por el método hidrométrico.

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. 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.

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 asfaltenos 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 asfaltenos, se distinguen dos tipos de asfaltos:

1. Tipo Sol (movimiento libre de las micelas): tienen una menor proporción de asfaltenos, 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 asfaltenos 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 solicitaciones 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 parafínica 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 2.2.

Tabla 2.2. Clasificación de los materiales asfálticos.

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	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 2.3, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

Tabla 2.3 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 2.2. • 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 2.2 • 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 2.2
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 2.2 • 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 2.2
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 2.2 • 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 2.2 • 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 catiónicas, 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.

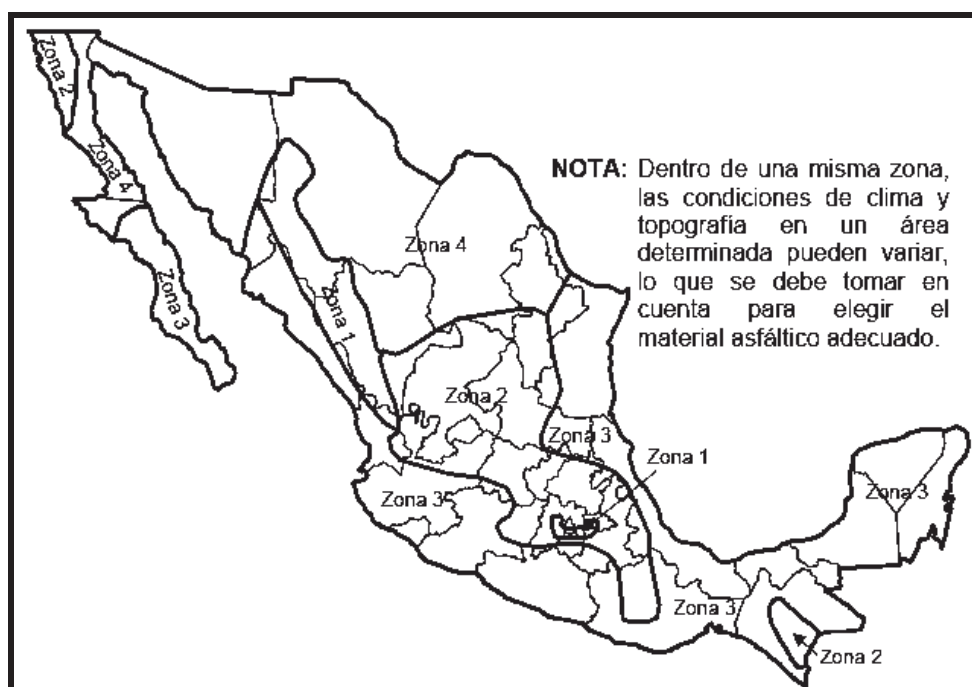


Fig. 2.2.- Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C.

- 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 2.4.

Tabla 2.4. Clasificación de las emulsiones asfálticas.

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
60			
EAR-60	60	Rompimiento medio	
65			
EAL-55	55	Rompimiento lento	

60			Catiónica
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	
65			
70			
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

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 2.5.

Tabla 2.5 Clasificación de los asfaltos rebajados.

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

2.2.5 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 $0.9 - 1.4 \text{ g/cm}^3$. 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.

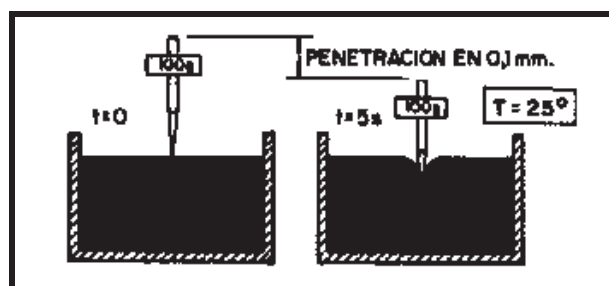


Fig. 2.3 Ensayo de penetración.

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 asfálticos 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.

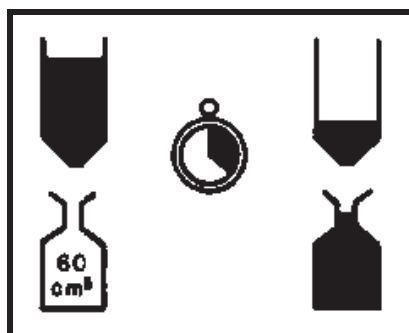


Fig. 2.4 Determinación de la Viscosidad Relativa.

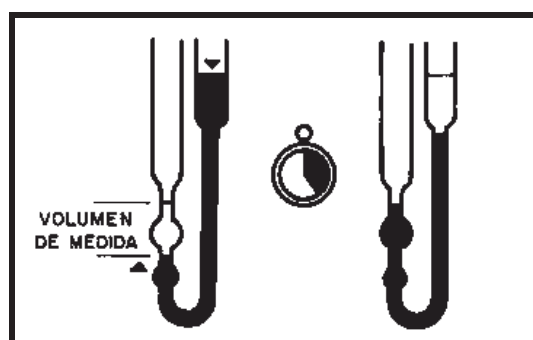


Fig. 2.5 Viscosímetro Capilar.

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.

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.

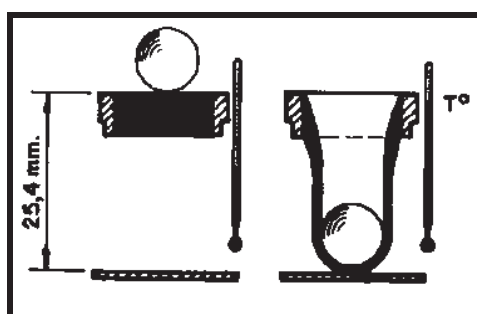


Fig. 2.6 Ensayo de Punto de Reblandecimiento (Anillo y Bola).

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.

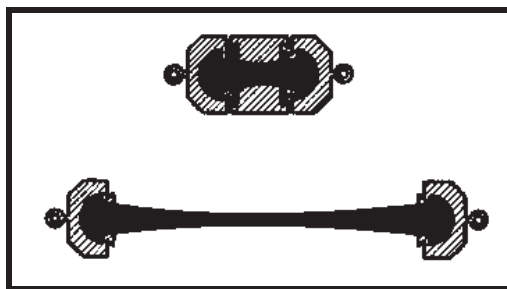


Fig. 2.7 Ensayo de Ductilidad.

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.

2.2.6 Asfaltos modificados.

Definición y Clasificación.

La modificación de asfalto es una 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).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (huellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad.

Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Propiedades de los ligantes y mezclas asfálticas.

Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las

mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón de los áridos, mientras que las preparadas con alto contenido de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de ligante, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que le ligante llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

Por otro lado a temperaturas de servicio bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico. Disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho precedentemente a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de la mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

Propiedades y especificaciones de los asfaltos modificados con polímeros.

Propiedades.

Tipo de Modificador	Ejemplo
Elastómeros	Natural
	SBS
	SBR
	EPDM
	PBD
	EVA
	EMA

Plastómeros PE
 PP
 Poliestireno
Fig. 2.8 Polímeros utilizados con asfaltos

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos o miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termofijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas, etc. Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados.

Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).

Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas. (Ejemplos: EVA, SBS).

Plastómeros: al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Dentro de estos tenemos:

- EVA: etileno-acetato de vinilo.
- EMA: Etileno-acrilato de metilo.
- PE: (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- PP: (Polipropileno).
- Poliestireno: no son casi usados.

Elastómeros: al estirarlos, a diferencia de los anteriores, estos vuelven a su posición original, es decir, son elásticos.

Dentro de estos tenemos:

- Natural: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales.
- SBS (estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que este es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.

- SBR: Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.
- EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

Termoendurecibles: estos tienen muchos enlaces transversales que impiden que puedan volver a ablandarse al calentarse nuevamente. Son ejemplos de estos las resinas epóxi; estas se usan en grandes porcentajes, mayores al 20%, son muy costosas y se utilizan para casos especiales (ejemplo: playa de camiones).

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

Esta micromorfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

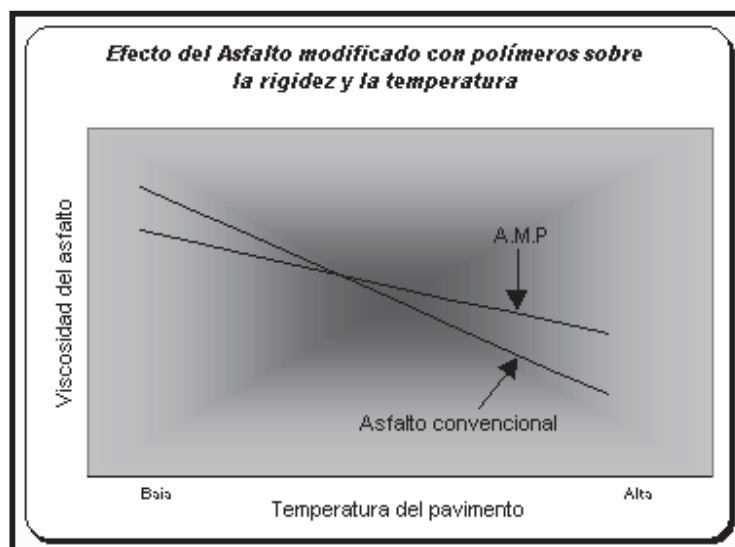


Fig. 2.9 Efecto del asfalto modificado con polímeros sobre la rigidez y la temperatura

Otras propiedades que el asfalto modificado mejora respecto del asfalto convencional son:

- Mayor intervalo de plasticidad (diferencia entre el punto de ablandamiento y el Fraass).
- Mayor cohesión.
- Mejora de la respuesta elástica.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero incorporado.
- Característica y estructura coloidal del asfalto base.
- Proporción relativa de asfalto y polímero.

Para que los asfaltos con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatible con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de esta el polímero solo actúa como un filler; y por debajo de esta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Para analizar la compatibilidad de los polímeros con el asfalto base tenemos:

- a) Criterio del índice de IMAMURA.
- b) Mediante tablas de solubilidad.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad. El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas (pellets) o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

En la actualidad muchos fabricantes de asfaltos, han instalados equipos especializados para la preparación de A.M.P, estas centrales producen asfaltos modificados con polímeros que alcanzan altas prestaciones.

Especificaciones.

En razón que los asfaltos presentan un comportamiento reológico de tipo viscoelástico, la adición de un polímero incrementa su componente elástica. Los ensayos típicos de "Penetración" y "Punto de Ablandamiento", no miden elasticidad ni recuperación elástica, características típicas de los asfaltos modificados, de ahí que deba recurrirse a otros tipos de ensayos. Un método que ha sido adoptado en muchos países de Europa, es el de "Recuperación elástica", basado en el ensayo convencional de "Ductilidad".

Hasta el momento no se tiene conocimiento de una especificación para asfaltos modificados con polímeros modificados por parte de instituciones oficiales. Sí se conocen especificaciones que se ajustan a determinados productos comerciales; en estas especificaciones se incluyen, entre otros ensayos, el "Punto de fractura Fraass" y el ensayo de "Recuperación elástica".

Ventajas en las mezclas en servicio.

Los asfaltos modificados se deben aplicar, en aquellos casos específicos en que las propiedades de los ligantes tradicionales son insuficientes para cumplir con éxito la función para la cual fueron encomendados, es decir, en mezclas para pavimentos que están sometidos a solicitudes excesivas, ya sea por el tránsito o por otras causas como: temperaturas extremas, agentes atmosféricos, tipología del firme, etc. Si bien los polímeros modifican las propiedades reológicas de los asfaltos, estos deben mostrar ventajas en servicio; los campos de aplicación más frecuentes son:

- Mezclas drenantes: las mezclas drenantes tienen un porcentaje muy elevado de huecos en mezcla (superior al 20%) y una proporción de árido fino muy baja (inferior al 20%), por lo que el ligante debe tener una muy buena cohesión para evitar la disgregación de la mezcla. Además el ligante necesita una elevada viscosidad para proporcionar una película de ligante gruesa envolviendo los áridos y evitar los efectos perjudiciales del envejecimiento y de la acción del agua (dado a que este tipo de mezclas es muy abierta).

- Mezclas resistentes y rugosas para capas delgadas: La utilización de polímeros en este tipo de mezclas es para aumentar la durabilidad de las mezclas. Estos tipos de mezclas de pequeño espesor surgen dada a la rapidez de aplicación, lo que reduce al mínimo los tiempos de cortes de tráfico. Estas se utilizan para trabajos de conservación de rutas y vías urbanas, que exigen mezclas con alta resistencia y con una buena textura superficial.

La resistencia de estas mezclas se consigue con agregados de buena calidad, elevado porcentaje de filler (8 a 10%) y un asfalto modificado con polímeros.

La buena textura superficial para mejorar la adherencia de los vehículos se consigue mediante una granulometría discontinua (discontinuidad 2-6mm)

En este tipo de mezclas es de vital importancia la adherencias con la capa subyacente (esta también influye en la durabilidad). Estas también deben ser resistentes, para soportar la acción del tránsito y el desprendimiento de los áridos.

Estas mezclas son denominadas también microaglomerados y tienen espesores menores a los 30 mm.

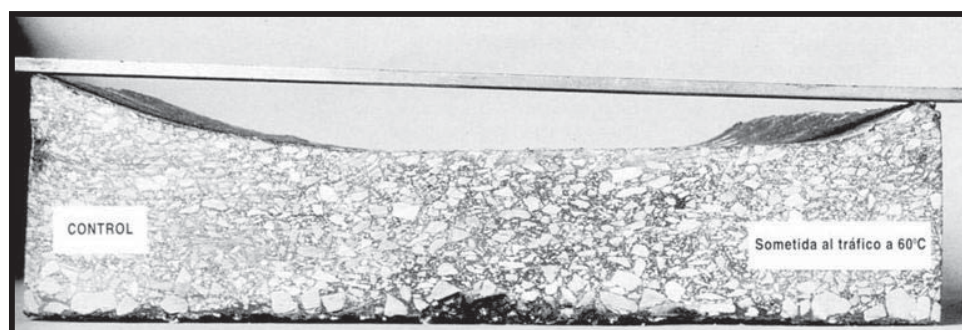


Fig. 2.10 Muestra de mezcla asfáltica convencional.

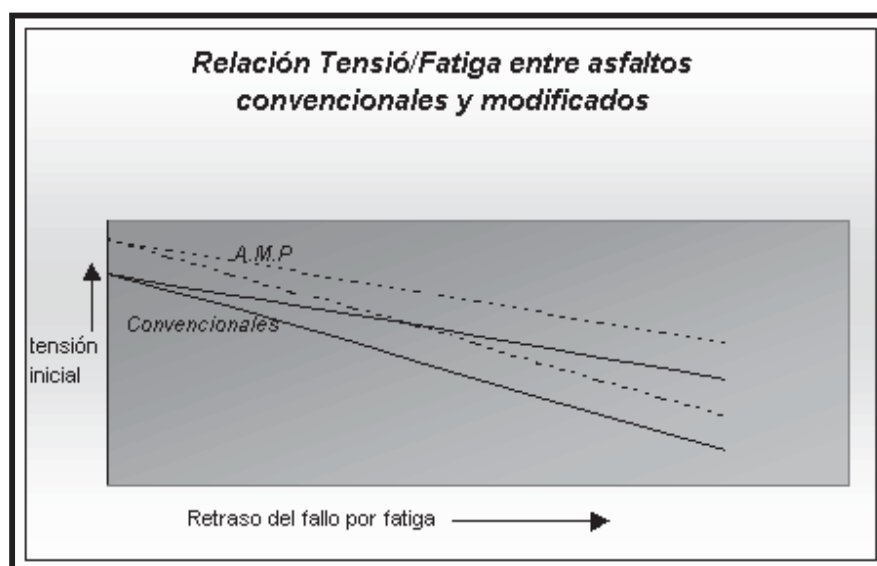
- Mezclas densas: Para las aplicaciones en las cuales se deban soportar tráfico intenso la mezcla bituminosa debe ser resistente al ahuellamiento. Al mismo tiempo, el material debe poder ser mezclado, extendido y compactado a temperaturas normales y no se debe volver frágil cuando la temperatura del pavimento descienda.



Fig. 2.11 Muestra de mezcla asfáltica modificada con polímeros.

Como puede observarse existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos sobre una muestra de mezcla asfáltica convencional y otra con una mezcla asfáltica modificada con polímeros, la mezcla modificada puede hacer frente al ahuellamiento con una marcada diferencia sobre la otra muestra.

En otras aplicaciones, el objetivo puede ser generar una mezcla flexible con el fin de reducir la posibilidad de rotura por fatiga. En estos casos, se necesitarán asfaltos modificados con polímeros, preferentemente de naturaleza elástica, para que la mezcla sea capaz de absorber las tensiones sin que se produzca la rotura.

**Fig. 2.12 Relación tensión-fatiga entre asfaltos convencionales y modificados.**

Se han realizados varios ensayos que han demostrado que los asfaltos modificados con asfaltos modificados con polímeros son capaces de asimilar mayores tensiones iniciales que las mezclas realizadas con una mezcla convencional.

- Tratamientos superficiales mediante el riego con gravilla: los A.M.P y las emulsiones con ellos fabricadas, son adecuados para riegos en vías de fuerte intensidad de tráfico y/o en zonas climáticas de temperaturas extremas, porque el ligante debe tener una buena cohesión en un amplio intervalo de temperatura y una buena susceptibilidad térmica, con el fin de evitar exudación del ligante durante el verano, así como la pérdida de gravilla en el invierno.

- **Membrana absorbente de tensiones:** estas membranas tienen como misión retardar la propagación de fisuras de un firme a un nuevo refuerzo, por lo que deben estar fabricadas con A.M.P para tener buena resistencia mecánica, resiliencia y flexibilidad para absorber las tensiones provocadas por el movimiento de las fisuras del firme.

Durabilidad de las mezclas asfálticas preparadas con ligantes modificados con polímeros.

En función de no contar con experiencias muy válidas en cuanto a la durabilidad de mezclas bituminosas modificadas con polímeros, se hace necesario implementar métodos de laboratorio para evaluar el comportamiento a corto y largo plazo de envejecimiento.

Como métodos de envejecimiento de las mezclas en laboratorio a corto y largo plazo se emplean los métodos desarrollados por SHRP (Strategic Highway Research Program).

Hay muy poca información de la degradación que sufren los polímeros componentes de los asfaltos durante su funcionamiento en servicio. En general los ensayos que se realizan para determinar la alteración que sufren los A.M.P recuperados del pavimento son muy complicados por el hecho de que el calentamiento de la mezcla y posterior disolución con solvente para obtener la muestra para luego ser ensayada, puede afectar las propiedades de ciertos polímeros y falsear los resultados.

Como es bien conocido el envejecimiento o endurecimiento de los asfaltos ocurre durante los procesos de mezclado y colocación de las mezclas (envejecimiento a corto plazo) y durante su vida de servicio en el pavimento (envejecimiento a largo plazo).

Para simular el envejecimiento a corto plazo se usan los ensayos TFOT y RTFOT.

Para simular el envejecimiento en servicio, SHRP ha adoptado el envejecimiento PAV.

En el caso de las mezclas asfálticas el SHRP ha propuesto para el envejecimiento a corto plazo el ensayo STOA y para el largo plazo el LTOA.

Se han realizado ensayos (los mencionados precedentemente) sobre muestras de ligante y mezclas bituminosas modificadas con polímeros llegando a la conclusión que los A.M.P, tienen un índice de envejecimiento más bajo que los convencionales.

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 modificador 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.

Ventajas del uso de asfaltos modificados:

- Disminuye la susceptibilidad térmica.
 1. Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento.

2. Se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento.

- Disminuye la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
- Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
- Mejora la trabajabilidad y la compactación: por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- Mejor impermeabilización: en los sellados bituminosos, pues absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
- Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.
- Mayor durabilidad: los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio, demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.
- Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos de conservación.
- Fácilmente disponible en el mercado.
- Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.
- Mayor resistencia al derrame de combustibles.
- Reduce el costo de mantenimiento.
- Disminuye el nivel de ruidos: sobre todo en mezclas abiertas.
- Aumenta el módulo de la mezcla.
- Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.

- Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.
- Permite un mejor sellado de las fisuras.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.
- No requieren equipos especiales.

Desventajas del uso de asfaltos modificados:

- Alto costo del polímero.
- Dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).
- Deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

Es evidente que la mayor desventaja de estos es el alto costo inicial del asfalto modificado, sin embargo, si hacemos un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la vía); podemos concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento.

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 accesibles 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 solicitaciones 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 solicitaciones 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.

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.

Textura superficial
Conductividad hidráulica
Absorción de ruido
Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico) Resistencia a la fisuración 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 fisuración térmica Resistencia a la fisuración 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	Significativas para			
	Rodadura	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/escurrecimiento 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.

3.3.2 Mezclas asfálticas en frío.

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

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.

CAPÍTULO 4.

MÉTODO DE DISEÑO PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Para nuestro caso explicaremos el método Marshall, ya que fue el utilizado para desarrollar el presente trabajo.

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.

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 lajeadas, %	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 (in)	12.5mm	19mm	25mm	37.5mm	50mm
		(1/2")	(3/4")	(1")	(1 1/2")	(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 ton (ESAL), esperando 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 (in)	12.5mm	19mm	25mm	37.5mm	50mm
		(1/2")	(3/4")	(1")	(1 1/2")	(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 – 15
0.075	No. 200	2 – 7	2 – 6	2 – 5	1 – 4	0 – 3

ΣL = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton (ESAL), esperando 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	1/2	13,0	14,0	15,0
19,0	3/4	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.

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 irrecuperable 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.

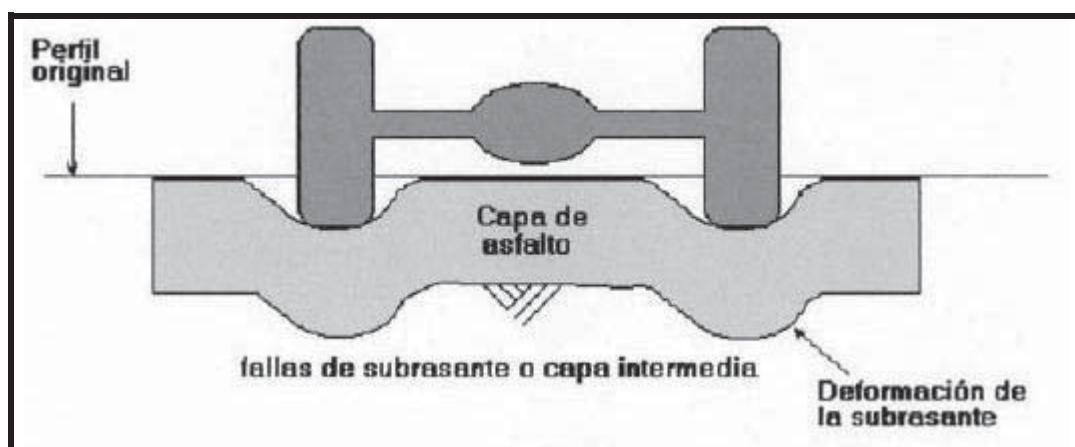


Fig. 5.1 Roderas por fallas en la subrasante.

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 curvadas 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.

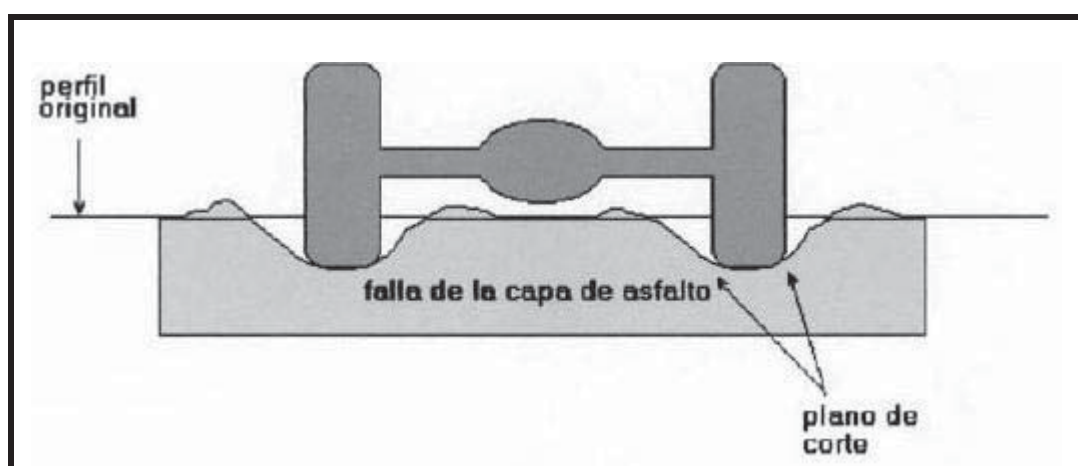


Fig. 5.2 Roderas por fallas en la mezcla asfáltica.

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 funcionan 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.

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.

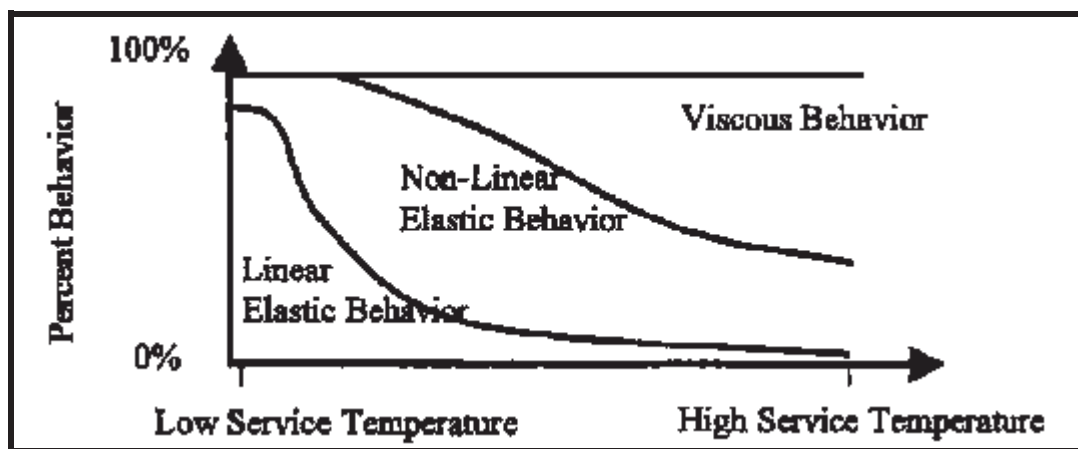


Fig. 5.3 Cambio en el comportamiento de la mezcla asfáltica en función de la temperatura. GERALD A. HUBER. (1999).

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).

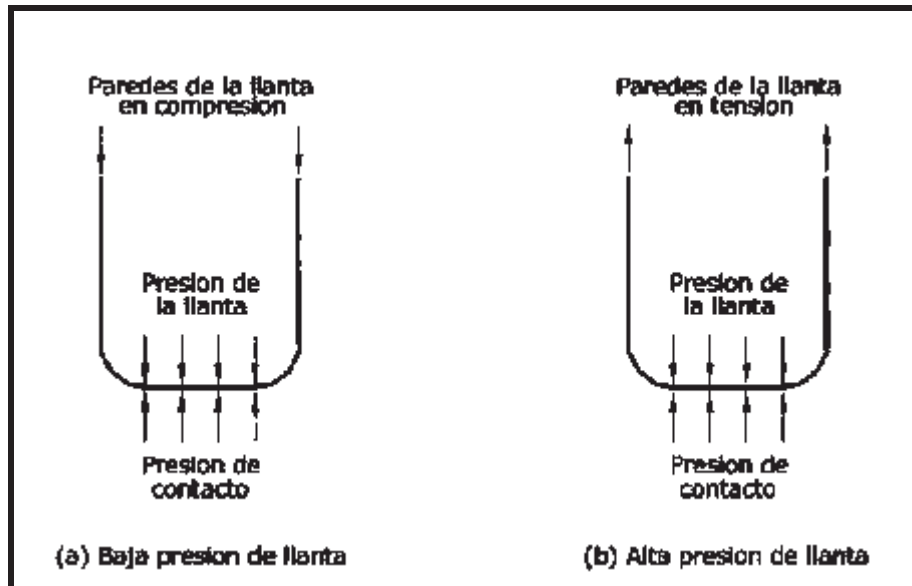


Fig. 5.4 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta.

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 que 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 sollicitaciones 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 dos 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 crítica, 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.

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.

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 de deformación plástica de una mezcla asfáltica, tanto para mezclas fabricadas como para testigos de pavimento. Para probetas circulares de 4 in y 6 in de diámetro.

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

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:

1. Unidad de alimentación de presión de aire.
2. Unidad de 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.



Fig. 6.1 Compresor de aire.

Unidad de 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.



Fig. 6.2 Unidad de 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.



Fig. 6.3 Cámara Termostática

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.



Fig. 6.4 Unidad de aplicación de carga.



Fig. 6.5 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.



Fig. 6.6 Material y moldes a utilizar



Fig. 6.7 Compactador y probetas terminadas

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 6.1 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 Secado del material.

Antes de comenzar con la explicación referente al trabajo desarrollado para esta tesis, debemos mencionar que tanto el muestreo, como la granulometría del material utilizado no lo realizamos nosotros, todo este procedimiento ya había sido hecho por las personas a las cuales se les realizó el trabajo, es decir, la gente de Grupo García Ascencio.

Una vez que llegó el material al laboratorio de materiales de la universidad, se procedió a realizar el secado del material, se sacó de las bolsas en las cuales lo habían llevado y se extendió en el patio del laboratorio. La eliminación de la humedad se pudo lograr en un tiempo de 3 horas aproximadamente.

7.2 Granulometría.

Como ya mencionamos anteriormente la granulometría del material ya había sido hecha por las personas que solicitaron el trabajo, pero de igual forma se realizó nuevamente en el laboratorio de materiales de la universidad para verificar y comparar con la curva que estas personas enviaron.

Otro aspecto que debemos tomar en cuenta es que el material llegó separado en dos partes una era agregado grueso y la otra agregado fino, ya que de el 100 % del material, el 40 % correspondía al agregado grueso y el 60 % al fino, es decir, de esta forma se conformarían las probetas que serían utilizadas para la prueba.

Ya seco el material se procedió a homogeneizarlo para hacer el cuarteo, que como sabemos con el material ya homogeneizado se forma un cono de unos 15 a 20 cms. Y este se divide en cuatro partes iguales de las cuales se tomaran 2 opuestas una de la otra y de ahí obtener la muestra que se utilizaría para hacer la granulometría.

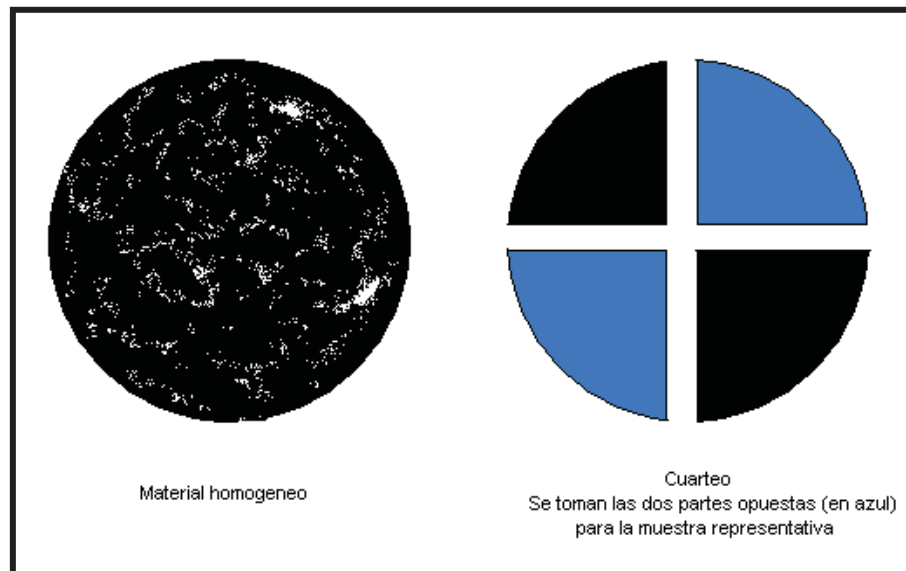


Fig. 7.1 Cuarteo

Para realizar la granulometría se usaron las siguientes mallas: 1", 3/4, 1/2, 3/8, 1/4, 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 y charola.

La separación de los tamaños de dicha muestra se hizo manualmente para la grava o material grueso y mecánicamente para la arena o material fino.



Fig. 7.2 Mallas y equipo mecánico de cribado

7.3 Preparación del material

Una vez realizada la granulometría se procedió a preparar el material para comenzar a fabricar las probetas.

Primeramente se peso el material, ya que cada probeta constaría de 1000 gramos de material pétreo, de los cuales 400 gramos son de material grueso y 600 gramos de material fino, además del asfalto el cual el contenido optimo fue de 6.50 %.

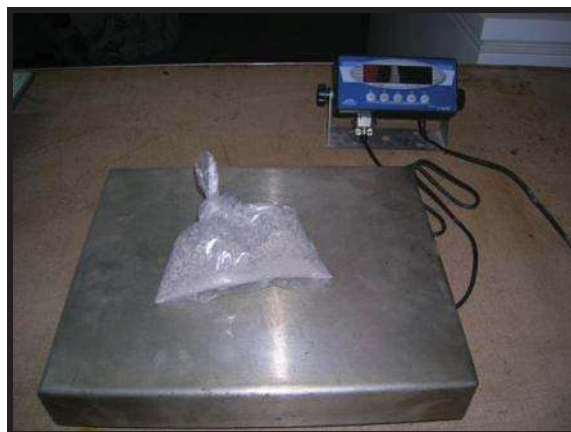


Fig. 7.3 Báscula Digital

Posteriormente se obtuvo el asfalto AC-20 blanco, es decir, se tomó la cantidad necesaria para la fabricación de todas las probetas. En los casos donde se mezcló algún aditivo se hicieron los cálculos respectivos para introducir la cantidad necesaria.

Es importante mencionar los tipos de asfalto que se utilizaron, es decir, con los distintos tipos de aditivos y modificadores, estos se enlistan a continuación:

1. AC-20 Blanco.
2. AC-20 + Elvaloy.
3. AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”.
4. AC-20 + Látex Butonal 1118.
5. AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”.
6. AC-20 + Látex Butonal 1118 + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”.

Como ya se mencionó anteriormente, los cálculos para las proporciones de los aditivos se presentan mas adelante.

Ya pesado el material y teniendo lista la cantidad de asfalto que se utilizaría para la fabricación de las probetas, se colocó el material pétreo en charolas, las cuales se introdujeron al horno junto con los moldes durante 24 horas.

Para el caso del asfalto es suficiente colocarlo en el horno durante 2 horas para que este cuente con mayor manejabilidad.



Fig. 7.4 Horno Eléctrico

7.4 Fabricación de las probetas.

Una vez transcurridas las 24 horas se comienza con la fabricación de las probetas, se hace el mezclado del material pétreo con el asfalto, colocando la charola sobre una parrilla la cual con el calor nos facilita este trabajo. Ya mezclado completamente el asfalto con el material pétreo, se coloca en los moldes y estos a su vez se pasan al compactador.

Para la compactación se utilizó el compactador Marshall, 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.

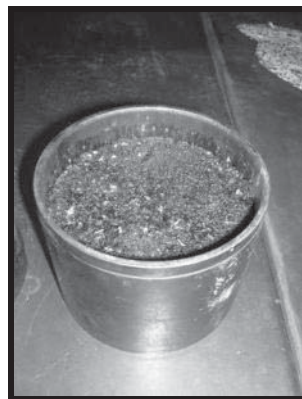


Fig. 7.5 Molde con mezcla asfáltica

Ya compactada la mezcla y después de un tiempo para permitir la estabilidad de esta, se saca de los moldes para posteriormente dejarla 24 horas antes de seguir con el desarrollo del trabajo.

Baño María.

Se preparó el baño María a una temperatura de 60° C, posteriormente se introdujeron 3 pastillas ó probetas de cada tipo de asfalto, en total se introdujeron 18 probetas. Para diferenciar unas probetas de otras se enumeraron de la siguiente forma:

- De la 1 a la 6 ---- AC-20 Blanco
- De la 7 a la 12 ---- AC-20 + Elvaloy
- De la 13 a la 18 ---- AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”.
- De la 19 a la 24 ---- AC-20 + Látex Butonal 1118
- De la 25 a la 30 ---- AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”
- De la 31 a la 36 ---- AC-20 + Látex Butonal 1118 + Aditivo Promotor de Adherencia “Quimikao”



Fig. 7.6 Probetas terminadas

Las probetas o números de probetas introducidas fueron las siguientes:
1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 31, 32 y 33.

Estas se colocaron en baño maría una vez que este se había regulado a 60° C y el tiempo que estuvieron fue de 24 horas.

Después de este tiempo se sacaron del horno y se pusieron a secar otras 24 horas a temperatura ambiente.



Fig. 7.7 Probetas en baño maría

Pesos y Dimensiones de las Probetas.

Se obtuvieron primeramente tres alturas de cada probeta y posteriormente los pesos seco, peso sumergido y peso seco superficialmente. Las alturas se obtuvieron con un vernier y los pesos con la báscula digital.



Fig. 7.8 Pesos y dimensiones de las probetas

Corte de las Probetas.

Dado que para la colocación en los moldes, las probetas tienen que medir 5 centímetros de altura y estas superan esa altura, se tienen que cortar. El

corte se realizó con una cortadora eléctrica, utilizando para esto un disco especial.



Fig. 7.9 Corte de las probetas

7.5 Pruebas en la máquina de pista.

Una vez cortadas las probetas a una altura de 5 centímetros, primero se deben colocar las tres probetas a ensayar en el horno a una temperatura de 60°C , durante un tiempo de 2 horas y 30 minutos, al mismo tiempo se prende la máquina para regular la temperatura dentro de la cámara termostática a una temperatura 60°C . Una vez transcurrido este tiempo y ya con la temperatura regulada en la máquina se comienza con la prueba.



Fig. 7.10 Máquina de pista

Ya montadas las probetas se tienen que esperar 30 minutos para que se homogenice la temperatura. Cuando se baja la rueda se tienen que dar tres pasadas para conseguir un asentamiento de la rueda sobre las probetas, después de esto se para el carretón y se pone el micrómetro en cero, se cierra la ventana y transcurridos 5 minutos se comienza con la prueba.

7.6 Obtención de resultados.

Se determinan y anotan las deformaciones totales leídas en el micrómetro en los minutos 1, 3 y 5, contados a partir del comienzo; 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.

CAPÍTULO 8.

RESULTADOS Y COMPORTAMIENTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Como ya mencionamos anteriormente, para este trabajo no se realizó el muestreo de banco, ni el análisis del material pétreo utilizado, lo único que se hizo fue la granulometría del material y esto con el fin de comparar y rectificar lo hecho por la gente que solicito el trabajo.

8.1 Consideraciones granulométricas del material pétreo.

A continuación se muestran los resultados de la granulometría, cave mencionar que los resultados que ellos enviaron y los registrados en el laboratorio de la universidad fueron semejantes, con algunas variaciones mínimas en algunos datos de la curva.

Los resultados enviados fueron los siguientes:

Tabla 8.1 Granulometría del material pétreo

MALLA		% QUE PASA	DEL PROYECTO
(mm)	(in)		
25.0	1"		100 - 100
19.0	3/4"	100	88 - 100
12.5	1/2"	96	73 - 100
9.5	3/8"	89	65 - 100
6.3	1/4"	75	54 - 80
4.75	No.4	68	48 - 69
2.00	No.10	42	32 - 48
0.850	No.20	27	21 - 34
0.425	No.40	17	14 - 24
0.250	No.60	13	10 - 18
0.150	No.100	10	8 - 13
0.075	No.200	7	4 - 9

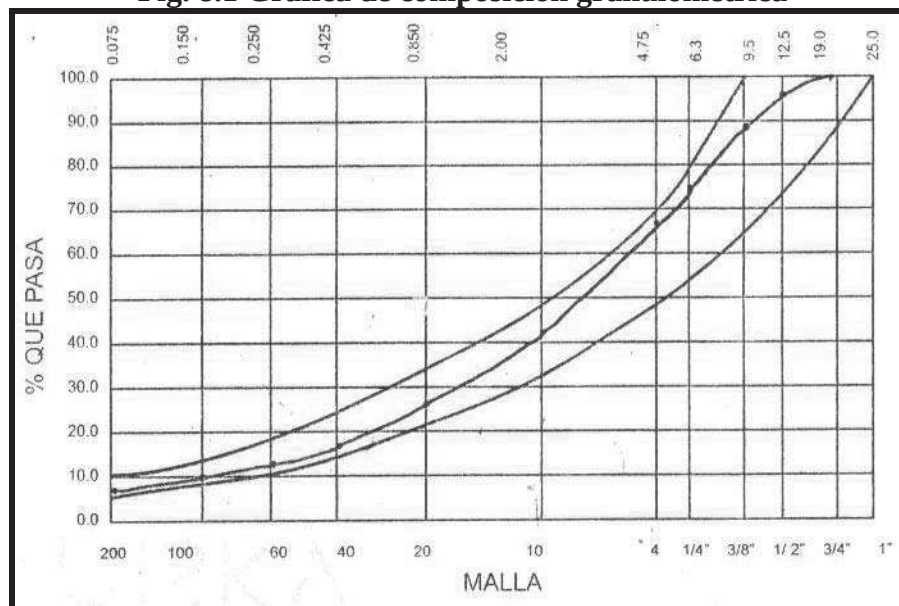
Y los resultados obtenidos en el laboratorio, son los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 8.2 Granulometría realizada en laboratorio

MALLA		% QUE PASA	DEL PROYECTO
(mm)	(in)		
25.0	1"		100 - 100
19.0	3/4"	100	88 - 100
12.5	1/2"	96	73 - 100
9.5	3/8"	87	65 - 100
6.3	1/4"	74	54 - 80
4.75	No.4	65	48 - 69
2.00	No.10	43	32 - 48
0.850	No.20	29	21 - 34
0.425	No.40	18	14 - 24
0.250	No.60	15	10 - 18
0.150	No.100	12	8 - 13
0.075	No.200	6	4 - 9

Así que de acuerdo a los resultados obtenidos con el análisis granulométrico se obtuvo la siguiente curva:

Fig. 8.1 Gráfica de composición granulométrica



8.2 Propiedades físicas del asfalto AC-20.

Como base principal de los asfaltos modificados tenemos el AC-20, al cuál se le agregaron los distintos aditivos y polímeros empleados para desarrollar este trabajo, 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 siguiente tabla:

Tabla 8.3 Requisitos de calidad para un cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°C

Características Del cemento asfáltico original:	Valor
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

8.3 Dosificación del aditivo y los polímeros.

A continuación se presentan los cálculos hechos para añadir o mezclar tanto el aditivo de adherencia y el látex. Cave señalar que el asfalto modificado con Elvaloy ya venía preparado desde Guadalajara, por lo cual para este ya no se hizo ninguna modificación, excepto en el caso donde se le agregó el aditivo promotor de adherencia.

AC-20 + Látex.

Para este caso primeramente se peso un tazón, el cuál tenía un peso de 99 grs. posteriormente se colocó cierta cantidad de AC-20 blanco en el tazón, se volvió a pesar y el peso fue de 729 grs. por lo tanto la cantidad de AC-20 blanco fue de 630 grs. Por lo cual dado que el porcentaje de látex era del 3 %, se obtuvo este porcentaje de los 630 grs. resultando así una cantidad de 19 grs. pero debemos tomar en cuenta que el látex viene en base agua por lo cuál sólo se considera el 65 % de sólidos, para esto entonces debemos decir que si del 100 % de una muestra sólo el 65 % es látex, que cantidad correspondería si le agregamos los 19 grs. calculados anteriormente con todo y agua, mediante una regla de tres se obtiene que la cantidad total a

agregar es de 29.2 grs. que ya al mezclarlo con el AC-20 y calentando esta mezcla el agua se evaporará y sólo quedará el látex y el AC-20.

AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia.

De igual forma que lo descrito anteriormente, primeramente se obtuvo el peso de un tazón y este fue de 98 grs. Se le agrego AC-20 blanco y el peso fue de 726 grs. Por lo tanto se tienen 628 grs. de AC-20 blanco, el porcentaje de Aditivo a agregar es de 0.5 % de la cantidad total de asfalto que se tenga, por ello se obtuvo el 0.5 % de los 628 grs. resultando así una cantidad de aditivo promotor de adherencia de 3.14 grs.

AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia

Para este caso se obtuvieron 549.5 grs. de AC-20 blanco, y de igual forma que lo descrito anteriormente para el caso de la mezcla con látex, se obtuvo el 3 % de los 549.5 grs. resultando así una cantidad de 16.5 grs. pero recordemos que el látex viene en base agua, por lo tanto se obtiene la cantidad real y esta es de 25.4 grs. de látex.

Para agregar el aditivo de adherencia se considera ahora, tanto el peso del AC-20 (549.5 grs.) más el del látex (16.5 grs.) por lo tanto se suman estos pesos y se obtiene la cantidad de 566 grs. de igual forma se obtiene el 0.5 % de los 566 grs. y se obtiene una cantidad de 2.83 grs. de Aditivo Promotor de Adherencia.

AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia.

Se obtuvo una cantidad de AC-20 + Elvaloy (recordemos que este producto ya venia preparado desde Guadalajara) de 625.7 grs. como se dijo anteriormente la cantidad de aditivo a agregar es de 0.5 % respecto al total del asfalto, por lo cual se obtuvo el 0.5 % de los 625.7 grs. resultando así una cantidad de 3.15 grs. de aditivo promotor de adherencia para agregar.

Ya fabricadas las probetas se obtuvieron algunas características de estas, como fue dimensiones y pesos antes de ser cortadas a los 5 cms. de altura que se requieren y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8.4 Dimensiones y pesos de las probetas

No. PROBETA	ALTURA 1	ALTURA 2	ALTURA 3	PROMEDIO (cms)	PESO SECO (grs)	PESO SUMERGIDO (grs)	PESO SECO SUPERFICIALMENTE (grs)
1	5.63	5.55	5.56	5.58	1,016	576	1,018
2	5.87	5.79	5.77	5.81	1,066	603	1,069
3	5.71	5.74	5.63	5.69	1,052	605	1,055
4	5.57	5.52	5.53	5.54	1,038	596	1,041
5	5.55	5.6	5.54	5.56	1,050	608	1,053
6	5.43	5.47	5.53	5.48	1,056	617	1,056
7	5.9	5.84	5.94	5.89	1,054	597	1,062
8	5.75	5.68	5.7	5.71	1,061	609	1,063
9	5.72	5.68	5.72	5.71	1,052	603	1,054
10	5.78	5.72	5.66	5.72	1,047	600	1,052
11	5.55	5.58	5.62	5.58	1,032	592	1,036
12	5.59	5.55	5.52	5.55	1,036	595	1,039
13	5.64	5.58	5.61	5.61	1,047	601	1,049
14	5.63	5.58	5.69	5.63	1,051	605	1,053
15	5.55	5.55	5.57	5.56	1,045	606	1,049
16	5.5	5.52	5.49	5.50	1,042	606	1,043
17	5.62	5.67	5.63	5.64	1,050	604	1,053
18	5.54	5.49	5.48	5.50	1,051	611	1,052
19	5.63	5.66	5.61	5.63	1,053	604	1,057
20	5.63	5.68	5.62	5.64	1,046	598	1,051
21	5.49	5.44	5.44	5.46	1,020	592	1,024
22	5.73	5.67	5.67	5.69	1,050	599	1,054
23	5.74	5.69	5.68	5.70	1,057	608	1,061
24	5.57	5.49	5.44	5.50	1,035	593	1,037
25	5.53	5.51	5.56	5.53	1,046	607	1,047
26	5.69	5.72	5.69	5.70	1,051	605	1,054
27	5.94	5.93	5.88	5.92	1,049	586	1,053
28	5.72	5.59	5.72	5.68	1,050	602	1,053
29	5.53	5.57	5.65	5.58	1,043	603	1,045
30	5.92	5.93	5.82	5.89	1,045	591	1,051
31	5.68	5.68	5.75	5.70	1,052	600	1,056
32	5.72	5.65	5.66	5.68	1,057	608	1,060
33	5.53	5.48	5.56	5.52	1,037	599	1,041
34	5.55	5.64	5.65	5.61	1,049	605	1,052
35	5.82	5.82	5.72	5.79	1,057	602	1,062
36	5.59	5.59	5.52	5.57	1,037	596	1,040

8.4 Ensayo de Pista.

Se fabricaron un total de 36 probetas, de las cuales 6 fueron hechas con AC-20 blanco, 6 con AC-20 + Elvaloy, 6 con AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia, 6 con AC-20 + Látex, 6 con AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia y 6 con AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia.

De estas 36 probetas se tomaron 18 para colocarlas en baño maría durante 24 horas, es decir, se tomaron 3 de cada tipo de asfalto ya que para cada prueba en la máquina de pista se requieren de 3 probetas, esto quiere decir que se harían 2 pruebas para cada tipo de asfalto, sólo que unas sometidas a baño maría y otras no. El óptimo de asfalto para todas las probetas fue de 6.5 %.

Tabla 8.5 Probetas fabricadas para el ensayo de Pista

Tipo de Asfalto	Número de probetas (6.5 % Asfalto)
AC-20 Blanco	6
AC-20 + Elvaloy	6
AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia	6
AC-20 + Látex	6
AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia	6
AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia.	6
TOTAL	36

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 ensayada 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 deformación total de cada una de las probetas y el grado de severidad en las deformaciones plásticas.

Tabla 8.6 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 Blanco

AC-20 Blanco Prueba No. 1 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20 Blanco Prueba No. 2 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.254	1	0.1016
3	0.762	3	0.1778
5	1.0668	5	0.381
10	1.4478	10	0.7112
15	2.3368	15	0.9906
20	2.9464	20	1.143
25	4.1148	25	1.3208
30	4.318	30	1.4986
35	4.3688	35	1.651
40	4.445	40	1.8034
45	4.4704	45	1.905
60	4.699	60	2.3876
75	4.9784	75	2.921
90	5.1562	90	3.683
105	5.4356	105	4.5466
120	5.6896	120	5.334

Tabla 8.7 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 + Elvaloy

AC-20+Elvaloy Prueba No. 3 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20+Elvaloy Prueba No. 4 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.635	1	0.1778
3	0.8128	3	0.3556
5	0.9144	5	0.4572
10	1.016	10	0.5842
15	1.0414	15	0.7112
20	1.0668	20	0.7493
25	1.0922	25	0.8128
30	1.0922	30	0.8382
35	1.1176	35	0.8636
40	1.1176	40	0.889
45	1.143	45	0.9144
60	1.1684	60	0.9906
75	1.1684	75	1.0414
90	1.1938	90	1.10236
105	1.2065	105	1.143
120	1.2192	120	1.1938

Tabla 8.8 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia

AC-20+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 5 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 6 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.2794	1	0.127
3	0.4064	3	0.1524
5	0.4572	5	0.1524
10	0.4572	10	0.2032
15	0.4572	15	0.2794
20	0.4826	20	0.3302
25	0.51562	25	0.381
30	0.5334	30	0.4318
35	0.5588	35	0.4826
40	0.59182	40	0.5334
45	0.635	45	0.56896
60	0.762	60	0.7112
75	0.9398	75	0.80264
90	1.0541	90	0.9144
105	1.17602	105	1.0414
120	1.2954	120	1.1684

Tabla 8.9 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 + Látex

AC-20+Látex Prueba No. 7 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20+Látex Prueba No. 8 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.3048	1	0.635
3	0.5842	3	0.8382
5	0.7112	5	0.9652
10	0.889	10	1.1049
15	1.016	15	1.16332
20	1.0668	20	1.16332
25	1.143	25	1.16332
30	1.1938	30	1.16332
35	1.2319	35	1.16332
40	1.27	40	1.16332
45	1.3081	45	1.16332
60	1.397	60	1.16332
75	1.4732	75	1.16332
90	1.5494	90	1.17094
105	1.7018	105	1.23952
120	1.7272	120	1.32588

Tabla 8.10 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia

AC-20+Elvaloy+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 9 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20+Elvaloy+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 10 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.508	1	0.381
3	0.635	3	0.4572
5	0.7239	5	0.4826
10	0.8636	10	0.5334
15	0.9398	15	0.56388
20	0.97028	20	0.5842
25	0.9906	25	0.5969
30	1.02108	30	0.6096
35	1.0541	35	0.6223
40	1.07188	40	0.635
45	1.09728	45	0.64262
60	1.143	60	0.6604
75	1.19888	75	0.6731
90	1.2319	90	0.69088
105	1.2573	105	0.6985
120	1.27762	120	0.71628

Tabla 8.11 Resultados del ensayo de pista de probetas hechas con AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia

AC-20+Látex+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 11 CA 6.5 % Sumergidas		AC-20+Látex+Aditivo Promotor de Adherencia Prueba No. 12 CA 6.5 % No Sumergidas	
Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)	Tiempo (min)	Deformación Acumulada (mm)
0	0	0	0
1	0.6604	1	0.5588
3	0.889	3	0.7874
5	1.0414	5	0.889
10	1.2446	10	1.0414
15	1.3716	15	1.1176
20	1.4732	20	1.1684
25	1.5494	25	1.21412
30	1.651	30	1.26238
35	1.7018	35	1.2954
40	1.778	40	1.3208
45	1.8288	45	1.3462
60	1.9558	60	1.397
75	2.0828	75	1.4478
90	2.1844	90	1.4986
105	2.2987	105	1.5494
120	2.413	120	1.6002

Como podemos observar en las tablas mostradas anteriormente, existe una diferencia notable en cuanto a la deformación de las probetas que fueron sumergidas en baño maría y las que no fueron sometidas a este. Pero de igual forma debemos de tomar en cuenta, que la deformación se dio en todas y cada una de las pruebas que se hicieron, unas en mayor proporción que otras pero todas sufrieron de deformaciones.

Podemos darnos cuenta por los resultados y las características finales que presentaron las probetas, que las fabricadas con AC-20 Blanco fueron las que presentaron mayor deformación, es importante señalar y ya se había comentado anteriormente, que todas las probetas fueron sometidas a condiciones iguales, es decir, en cuanto al ensayo de pista la temperatura dentro de la cámara termostática era de 60 ° C, la carga aplicada fue la misma para todos los ensayos y el tiempo de aplicación de la carga fue el mismo.

Pero a diferencia del AC-20 Blanco, hubo otros que tuvieron mejor comportamiento, tomando en cuenta las condiciones a que fueron sometidas, primero se presenta un listado con las probetas que fueron sometidas a baño maría. El primero fue el que tuvo menor deformación y el último es el que presentó la mayor deformación.

1. AC-20 + Elvaloy
2. AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia
3. AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia
4. AC-20 + Látex
5. AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia
6. AC-20 Blanco

A continuación se presenta el listado de las probetas que no fueron sometidas al baño maría, de igual forma la primera fue la que tuvo menor deformación y la última la que presentó mayor deformación.

1. AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia
2. AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia
3. AC-20 + Elvaloy
4. AC-20 + Látex
5. AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia
6. AC-20 Blanco

Como podemos observar en ambos casos el orden no es el mismo, pero esto se entiende debido a las condiciones a las que fueron sometidas, aunque cave señalar que en los dos listados las que presentaron menor deformación, fueron las que contenían Elvaloy, dándonos cuenta de esta

forma que este polímero nos garantizará un buen comportamiento en nuestras carreteras.

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 deformación total y el grado de severidad en las deformaciones plásticas.

Fig. 8.2 Ensayo de Pista, AC-20 Blanco

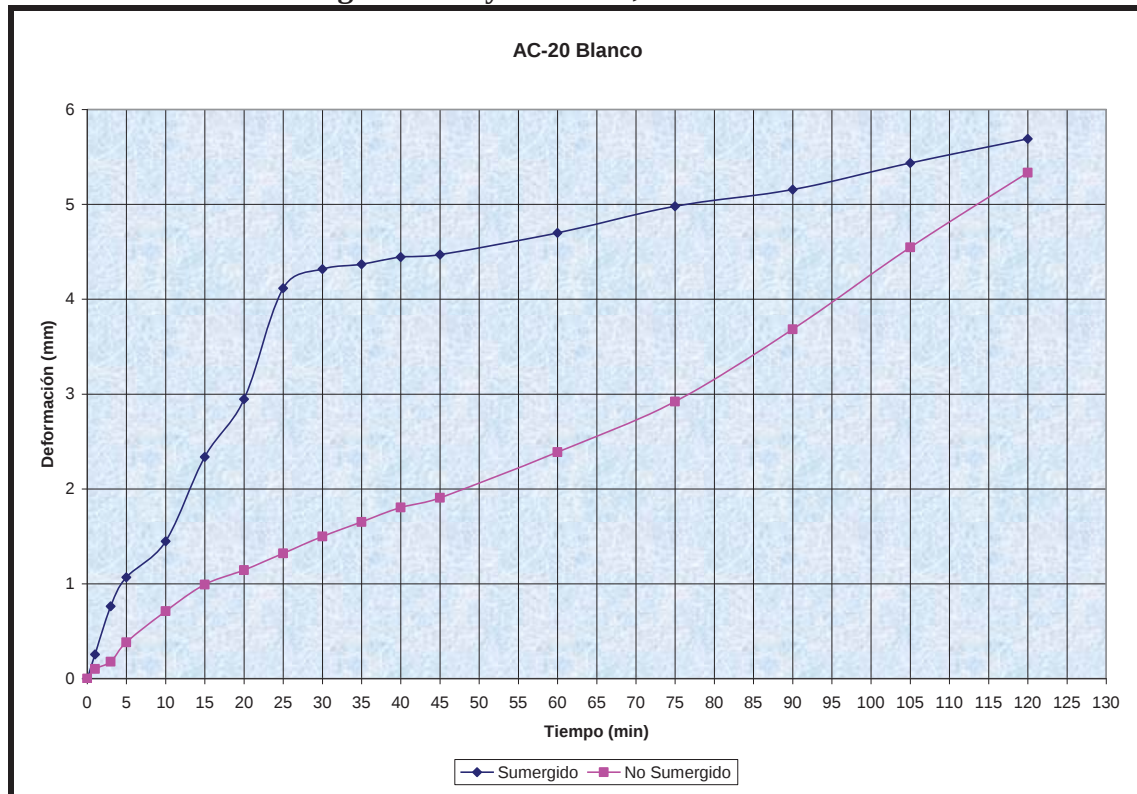


Fig. 8.3 Ensayo de Pista, AC-20 + Elvaloy

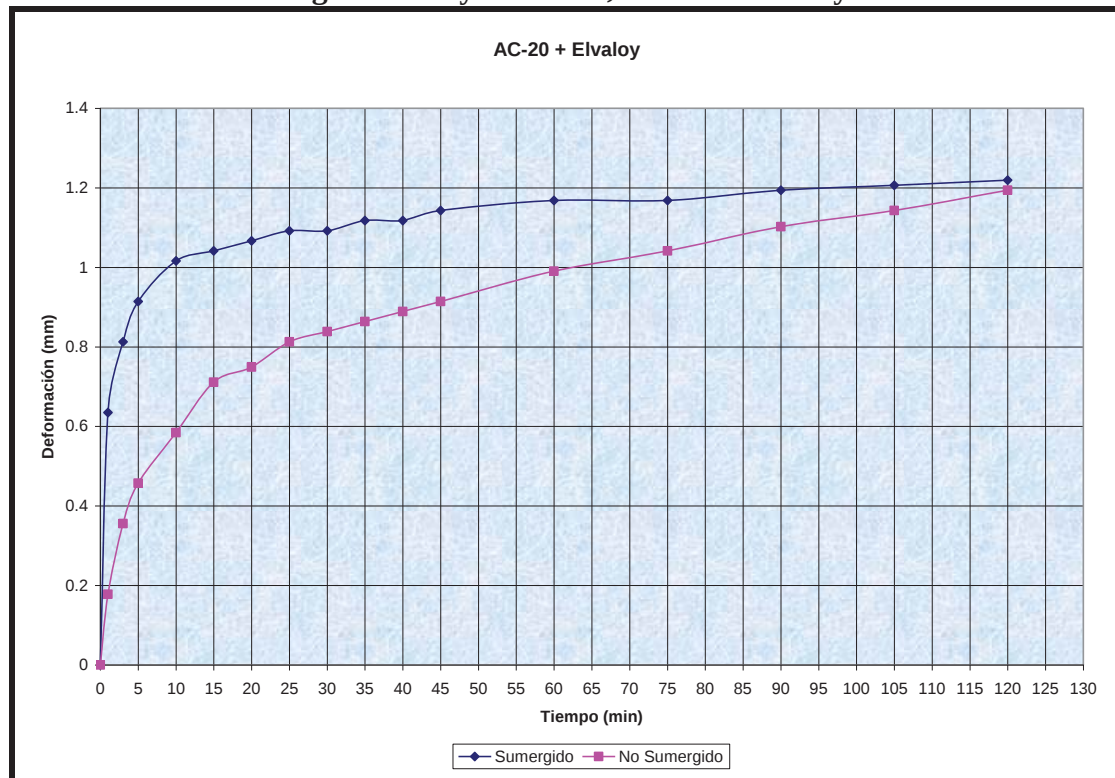


Fig. 8.4 Ensayo de Pista, AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia

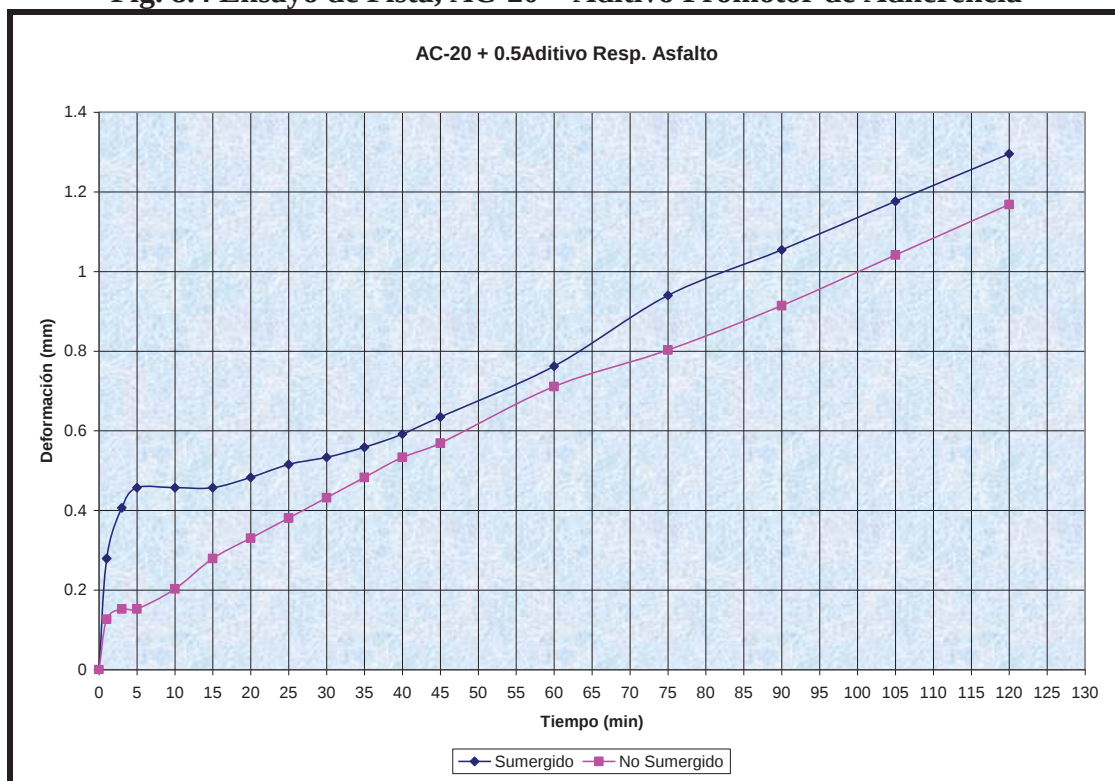


Fig. 8.5 Ensayo de Pista, AC-20 + Látex

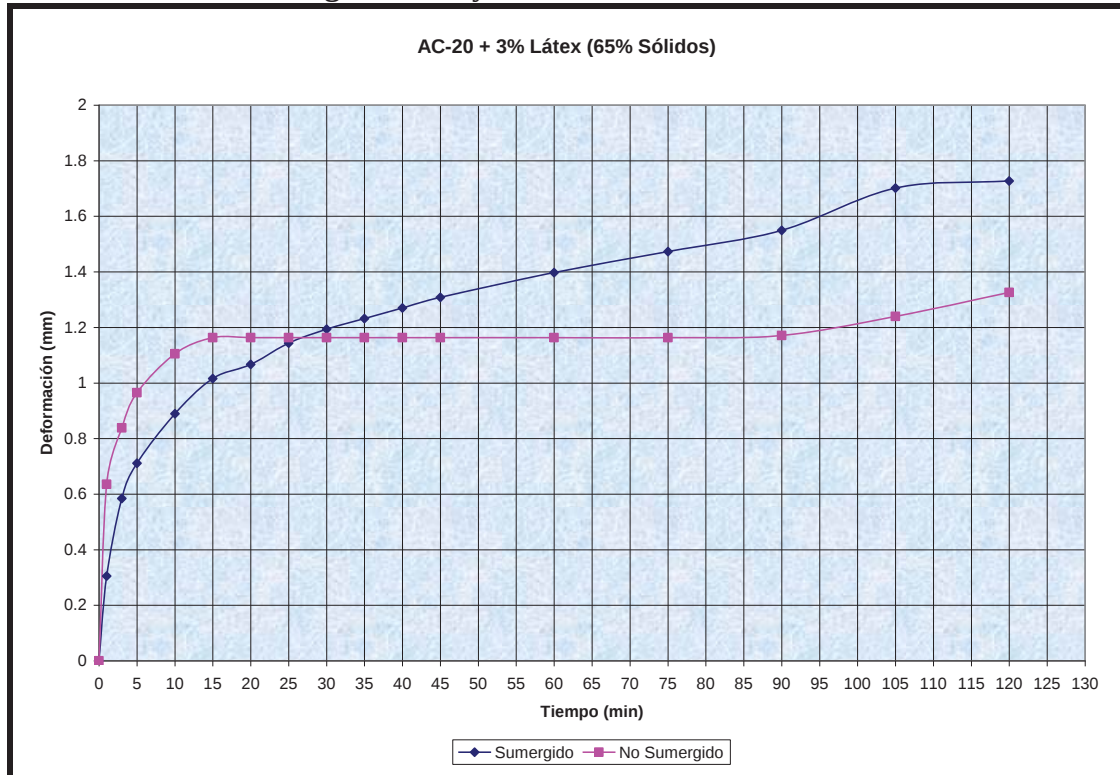


Fig. 8.6 Ensayo de Pista, AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia

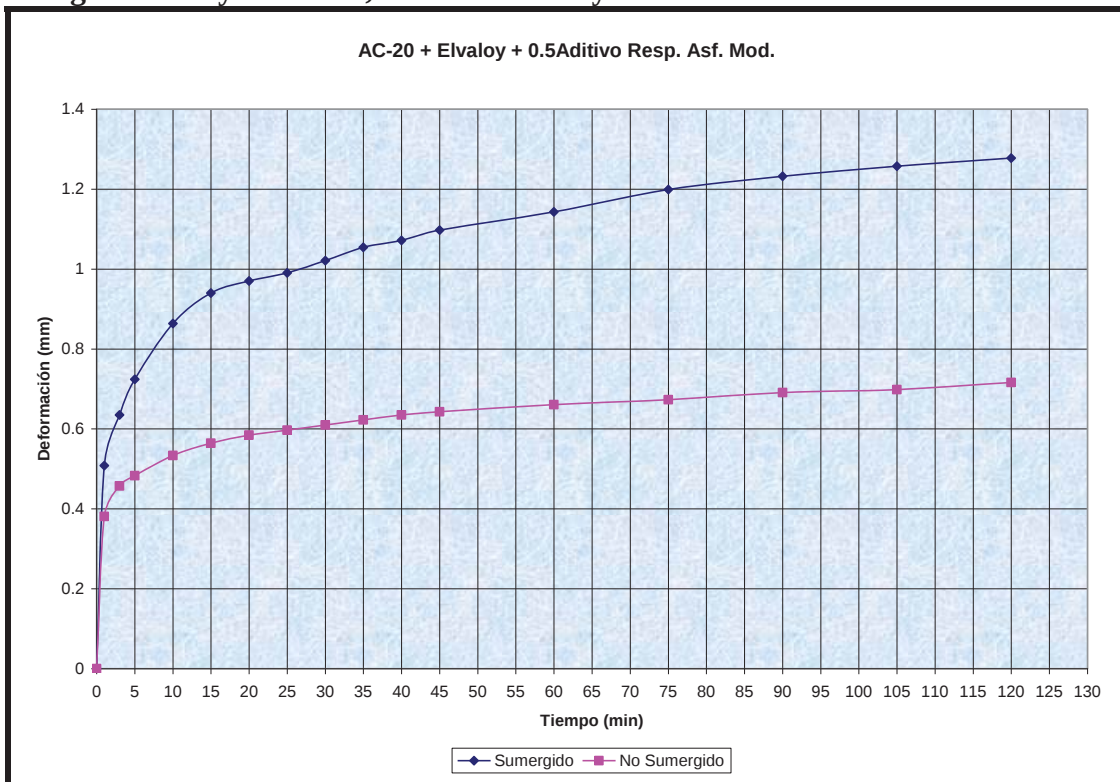
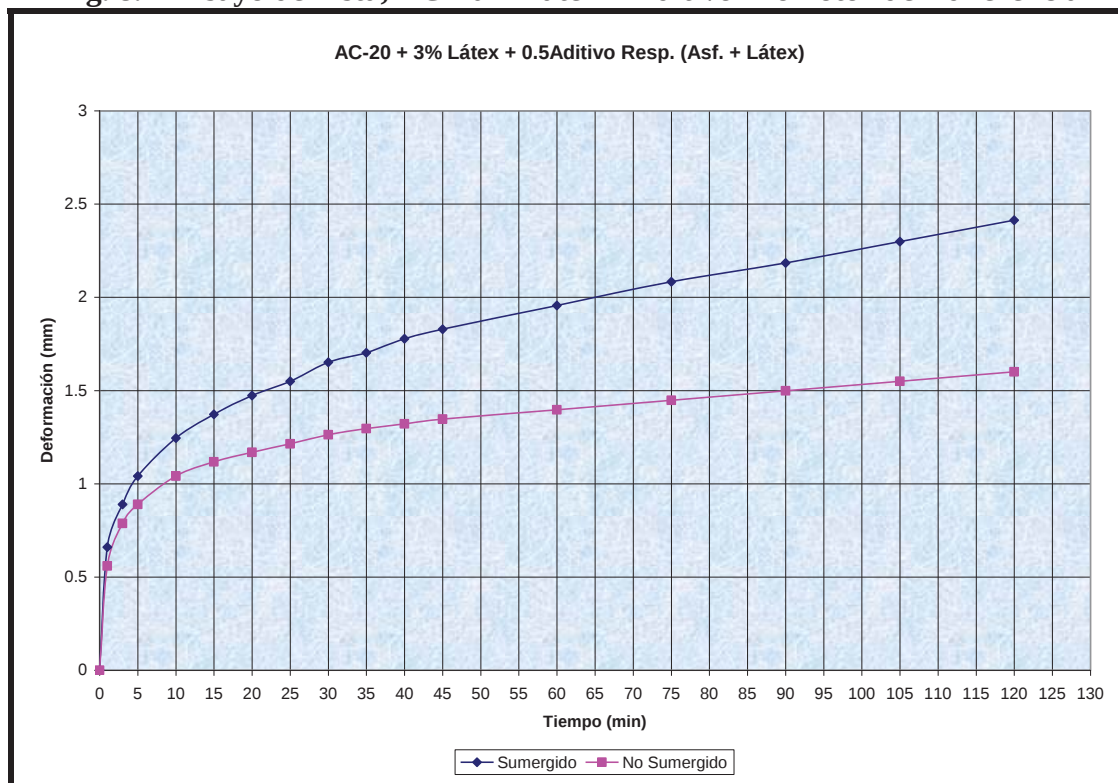


Fig. 8.7 Ensayo de Pista, AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia

De forma más clara en las figuras anteriores podemos observar el comportamiento que tuvieron las probetas al momento de ser ensayadas. Como vemos, en todos los casos la deformación de las probetas sumergidas en baño maría fue mayor que las que no fueron sumergidas.

En algunos casos el comportamiento de las curvas es algo raro, como podemos observarlo en las figuras (8.2, 8.4 y 8.5). Por ello debemos señalar la importancia que tiene la temperatura al momento de realizar los ensayos, como sabemos el ajuste o control de la temperatura se hace manualmente y durante todo el ensayo se tiene que estar vigilando que esta no varíe, aún estando frente a la máquina de pista es inevitable hacer que la temperatura se mantenga, siempre sube o baja por lo cual se desestabiliza la temperatura dentro de la cámara y quizá esto provoque que el comportamiento de las curvas se de esta forma.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la velocidad de la unidad de desplazamiento, ya que también se desestabiliza fácilmente por lo cual se tiene que estar atento a que dicha velocidad se mantenga de lo contrario se obtendrán resultados que serán muy distintos a los reales.

A continuación se muestran las gráficas en las que se presenta la deformación total al final de cada una de las pruebas, comparadas entre las que fueron sumergidas y las que no fueron sumergidas en baño maría.

Fig. 8.8 Deformación Total, AC-20 Blanco

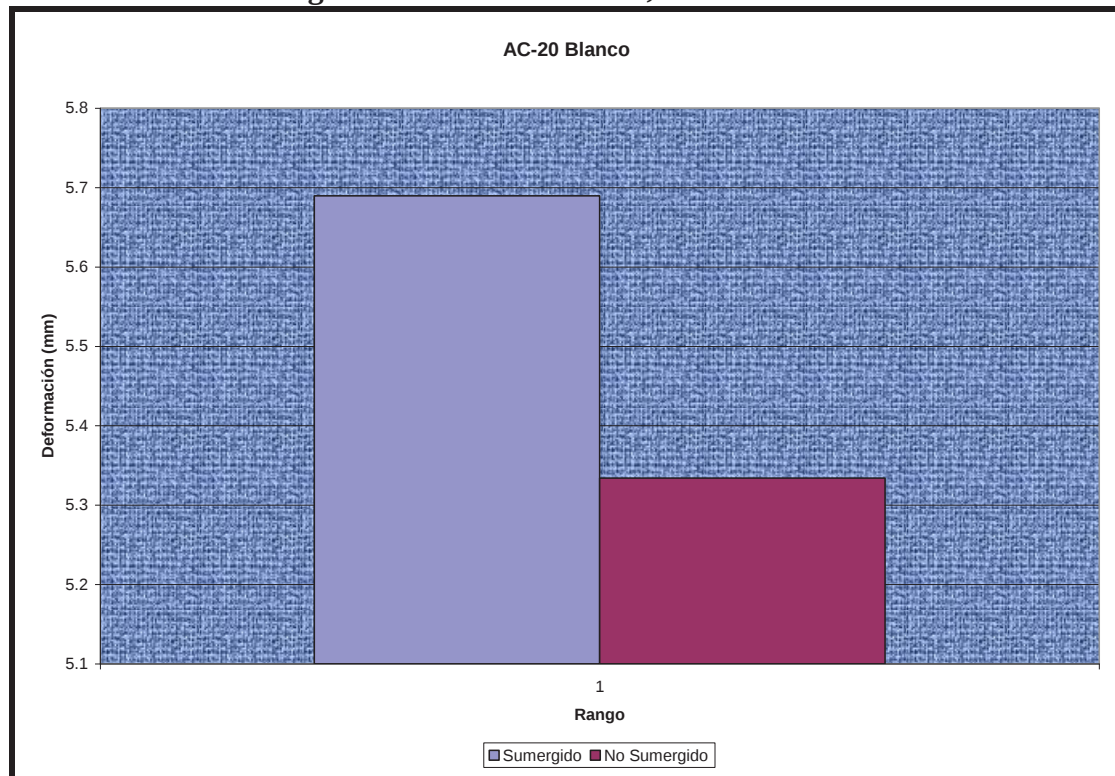


Fig. 8.9 Deformación Total, AC-20 + Elvaloy

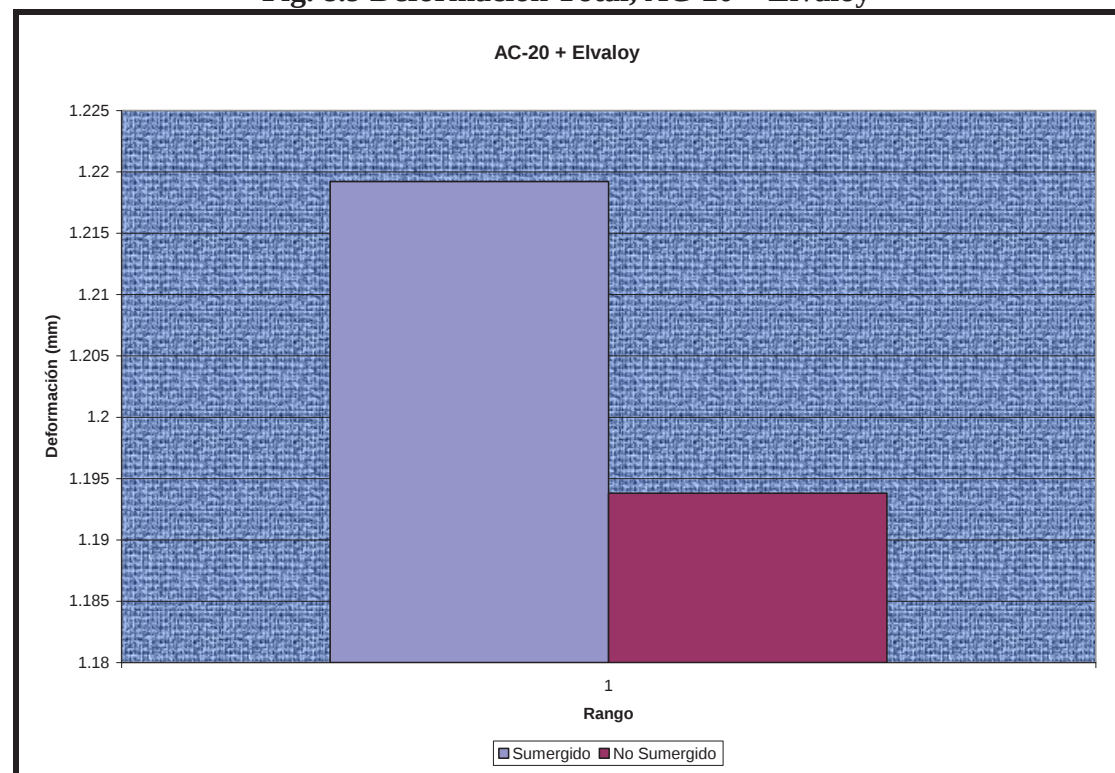


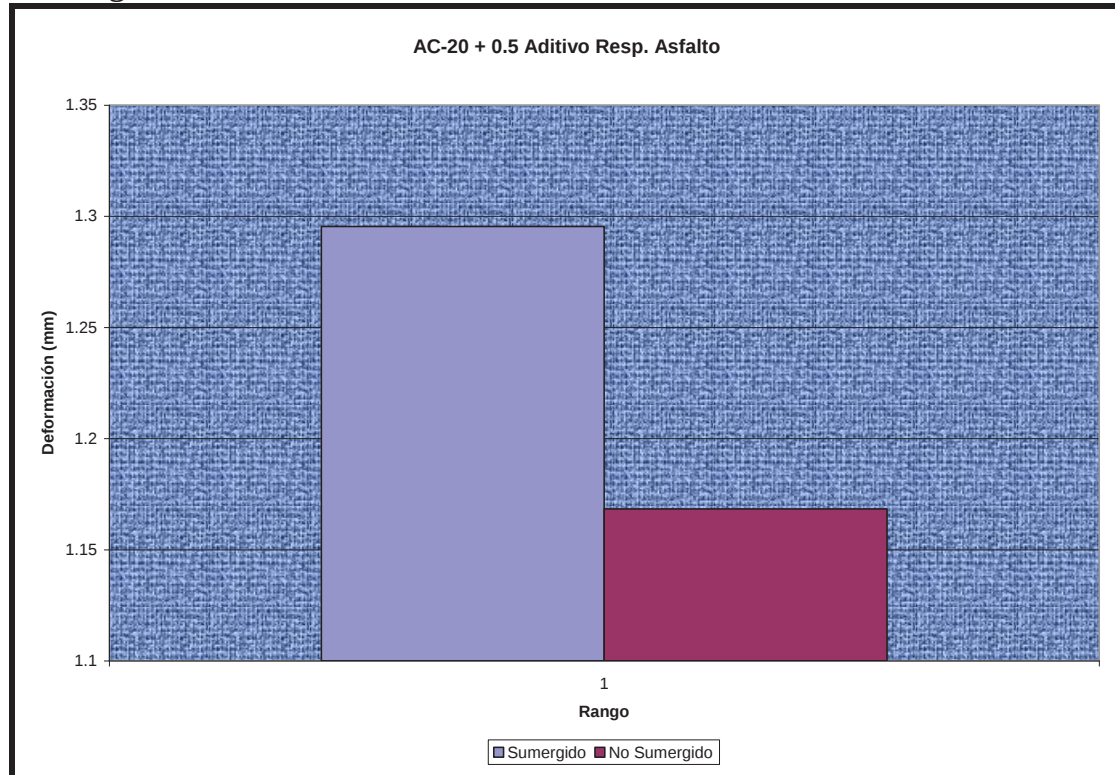
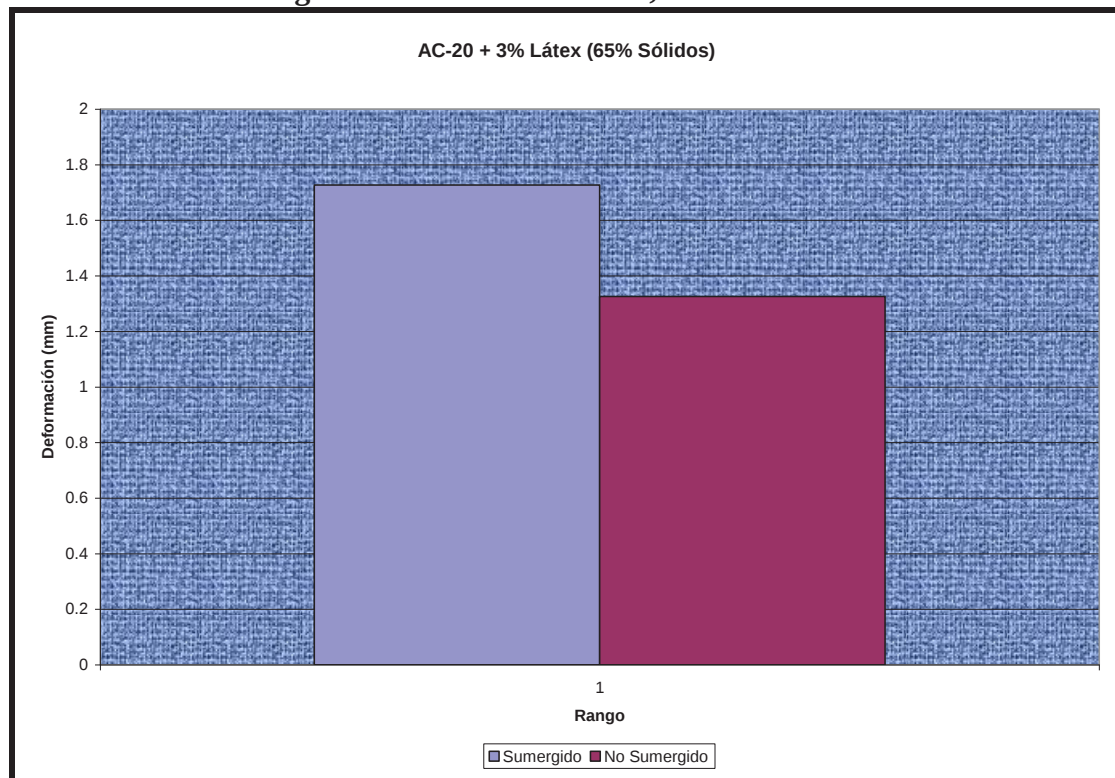
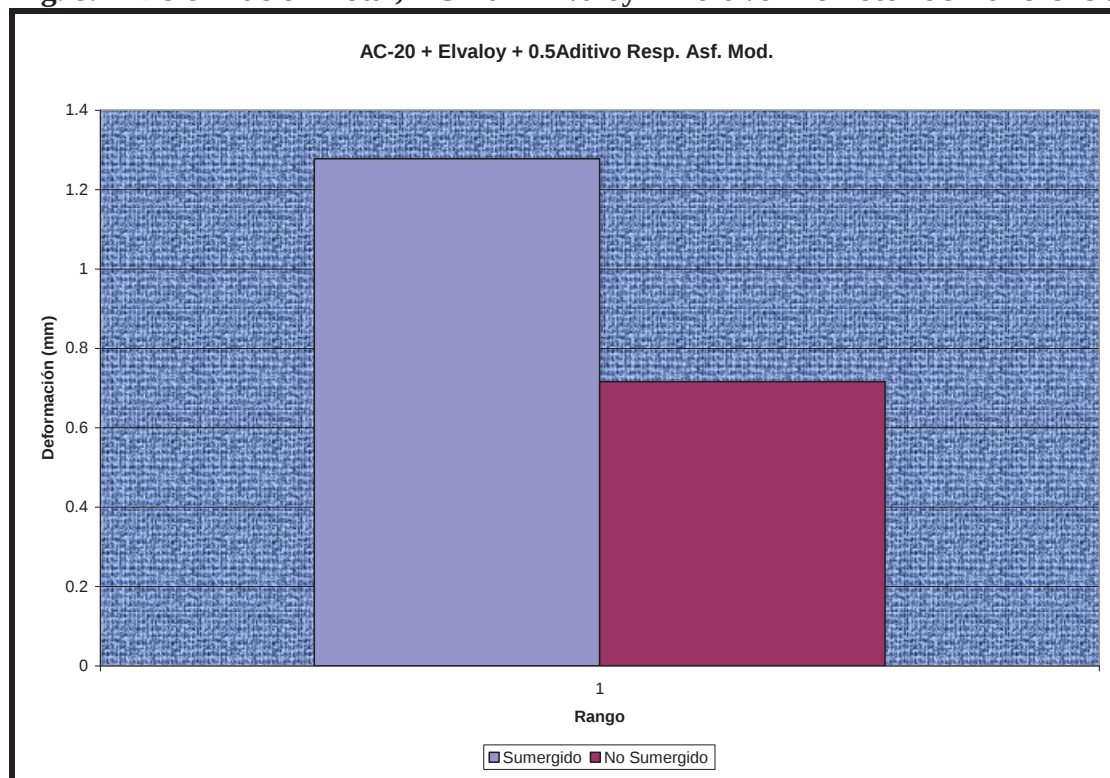
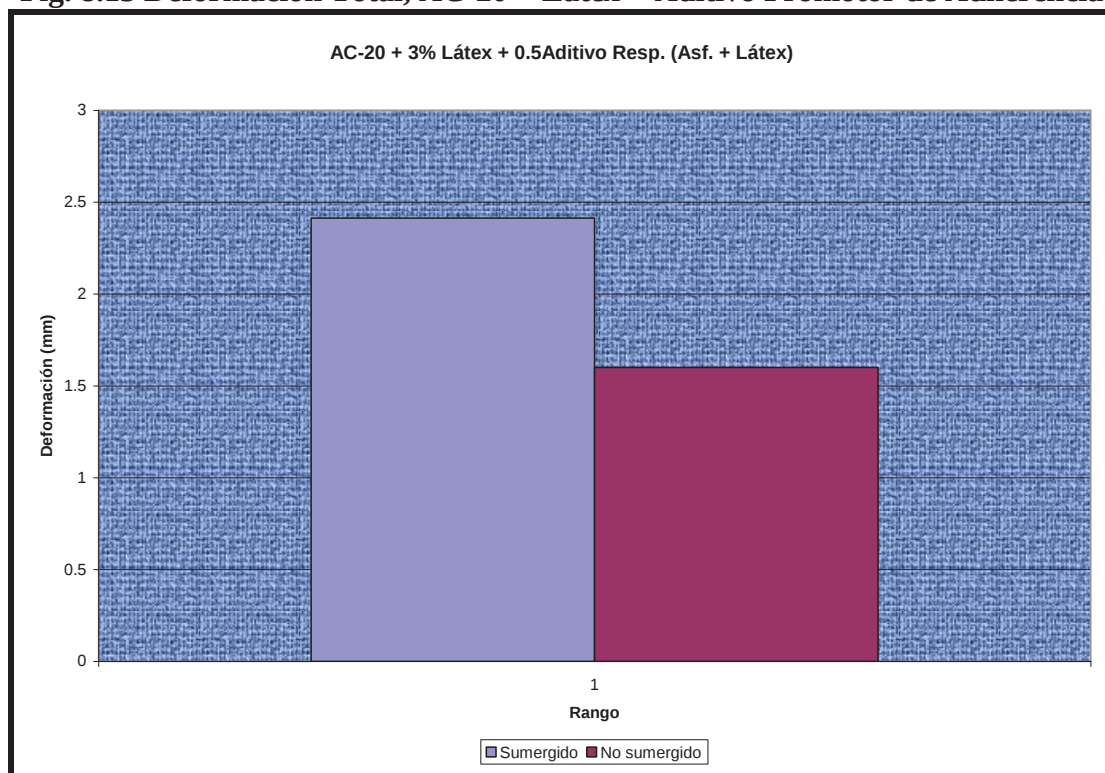
Fig. 8.10 Deformación Total, AC-20 + Aditivo Promotor de Adherencia**Fig. 8.11 Deformación Total, AC-20 + Látex**

Fig. 8.12 Deformación Total, AC-20 + Elvaloy + Aditivo Promotor de Adherencia**Fig. 8.13 Deformación Total, AC-20 + Látex + Aditivo Promotor de Adherencia**

Como habíamos mencionado anteriormente, en todos los casos la deformación total de las probetas sumergidas en baño maría fue mayor y esto lo podemos observar claramente en las figuras anteriores.

A continuación se muestran los porcentajes de deformación que tuvieron las probetas sumergidas y no sumergidas, unas respecto de otras pero del mismo tipo de asfalto, es decir, el intervalo que hay entre la deformación total de una y de otra.

Tabla 8.12 Porcentaje de deformación

Tipo de Asfalto	% Deformación
AC-20 Blanco	7 %
AC-20+Elvaloy	2 %
AC-20+Aditivo Promotor de Adherencia	11 %
AC-20+Látex	30 %
AC-20+Elvaloy+Aditivo Promotor de Adherencia	78 %
AC-20+Látex+Aditivo Promotor de Adherencia	51 %

Este porcentaje de deformación se puede observar más claramente en las figuras (de la 8.2 a la 8.7), es decir, este porcentaje se define como la deformación extra o de más que se da en una probeta de cierto tipo de asfalto al ser sometida a baño maría, comparada con otra del mismo tipo de asfalto pero que no fue sumergida en dicho baño.

CONCLUSIONES.

Es importante tomar en cuenta las condiciones reales en las que hoy en día se encuentran la mayoría de las carreteras en nuestro país, podemos observar que la mayoría de ellas se encuentran en un gran deterioro. Por ello debemos hacer más conciencia sobre los cuidados y en nuestro caso como ingenieros civiles, que los procedimientos constructivos se lleven a cabo de forma adecuada sin omitir ninguna norma o parámetro indicados en nuestro proyecto.

En este trabajo, pudimos observar que las condiciones a las que están expuestas las carreteras, influyen de manera directa para el daño o desgaste que se pueda presentar en estas.

Podría decirse a grandes rasgos por los resultados presentados, que aún añadiendo al asfalto el mejor aditivo o polímero conocido hasta hoy, se presentará un desgaste o deformación y que no tendría caso hacer un gasto extra, en cuanto a lo económico se refiere. Pero si nos ponemos a analizar los resultados, podremos darnos cuenta que añadido así sea el aditivo o polímero más censillo o común, siempre se mejoró el comportamiento de la mezcla asfáltica y esto se hizo en gran medida, es decir, en los resultados obtenidos se puede ver que las probetas hechas con el Asfalto Convencional o como se manejo en este trabajo AC-20 Blanco, fueron las que mayor deformación presentaron.

En cambio cualquiera de los otros tipos de asfalto modificados con el aditivo o los polímeros tuvieron mejor comportamiento, y esto se puede observar de forma clara, ya que como se anotó anteriormente la deformación total de las probetas hechas con AC-20 Blanco fue de 5.68 mm. En el caso en que fueron sumergidas en baño maría, y las que no fueron sumergidas tuvieron una deformación de 5.33 mm. Es decir, en ambos casos la deformación fue grande, en comparación con el asfalto que lo siguió en cuanto a resistencia de deformación como se mostró en el listado presentado anteriormente, y justamente el asfalto o probetas que tuvieron menor deformación que el AC-20 Blanco fue el que se modificó con Látex y Aditivo de Adherencia, y la deformación que tuvieron las probetas hechas con este tipo de asfalto y sumergidas en baño maría fue de 2.41 mm. Y la deformación de las sumergidas fue de 1.60 mm. Como podemos ver hay una gran diferencia respecto a las fabricadas con AC-20 Blanco y se mejoró en gran medida con sólo añadir este polímero y el aditivo.

Por supuesto de todos los tipos de asfalto analizados, hubo el que presento el mejor comportamiento y este fue el que se modificó con Elvaloy, aunque cave señalar que las condiciones a las que se sometieron fueron de gran importancia para el comportamiento del mismo, ya que el AC-20 + Elvaloy de todas las probetas sumergidas en baño maría, fue el que menor deformación tuvo con tan sólo 1.21 mm. Y de las probetas que no fueron sumergidas de todos los asfaltos el que menor deformación presentó fue el modificado con AC-20 + Elvaloy + Aditivo Adherencia, teniendo así este una deformación de 0.71 mm.

Como sabemos el tema desarrollado para este trabajo es muy amplio, y quizá algunos temas que se subdividen del mismo resulten algo complejos, pero es muy interesante saber con que características y que comportamientos tiene el asfalto, ya sea en su estado natural o modificado con algún aditivo o polímero.

Una pregunta que quizá varios nos hemos hecho es, como saldría más barato un proyecto u obra a efectuar, haciéndola con materiales baratos y de dudosa calidad o procedencia y estarle dando mantenimiento durante periodos cortos o hacerla con materiales de buena calidad y efectuarla con la normativa necesaria para dicha obra y por supuesto darle mantenimiento, pero en periodos de tiempo más largos, desde mi punto de vista creo que la opción que mejores resultados nos dará es la segunda y aunado esto a que se le pueda agregar algún aditivo o polímero en el caso de las carreteras resultaría mucho mejor. Este es el aprendizaje que me deja este trabajo, que se tienen que hacer las cosas respetando las reglas y las normas que nos rigen para la elaboración de las obras, y que se debe de analizar que opción es la mejor para cada caso y ya con esto, tomar la decisión correcta para hacer nuestro trabajo con calidad y conciencia.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

Páginas consultadas en Internet:

<http://www.carreteros.org>

<http://www.sct.gob.mx>

<http://www.imt.mx>

<http://www.e-asphalt.com>

<http://www.dispersores.com.ar/>

<http://www.basf.com/asfalto>

<http://www.asphaltinstitute.org>

<http://www.cpasfalto.org>