

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO.**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

**“ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS, MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH Y
ENSAYOS REOLÓGICOS”.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

NOÉ HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ.

DIRECTOR:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra.

Morelia, Mich., Septiembre del 2007.



A mis Padres...

Alberto y María.

A quien doy gracias por darme la vida, además de todo su apoyo y confianza, por enseñarme con su ejemplo a nunca rendirme y por su esfuerzo para educarme. Espero pagarles todo lo que hacen por mí.

A mis hermanos por su comprensión y crecer conmigo, en especial a Irerí que ha alegrado mi vida.

A todos mis amigos que siempre han estado apoyándome, brindándome su amistad y me han soportado, en todas las etapas de mi desarrollo.

A mi asesor de tesis el Dr. Jorge Alarcón, por su amistad, por apoyarme en este proyecto y por su confianza al brindarme la oportunidad de integrar varios proyectos.

A mi co-asesor el Dr. Mauricio Centeno, por abrirme las puertas en Guadalajara, brindarme su amistad y por sus consejos.

A la empresa SURFAX S.A de C.V. por la oportunidad de realizar este proyecto y por su apoyo; a todo su personal que participo en el proyecto y que me hizo sentirme como en casa.

“GRACIAS”



Índice.

Introducción.....	1
Objetivos.	4
CAPITULO 1	
- Pavimentos Flexibles.....	6
1.1.- Antecedentes.....	6
1.2.- Definición y Clasificación de un Pavimento.....	9
1.3.- Composición de un Pavimento Flexible.	11
1.3.1.- Terracerías.	11
1.3.2.- Sub-base.....	14
1.3.3.- Base.	14
1.3.4.- Superficie de Rodamiento.....	14
1.4.- Tipos de Fallas en los Pavimentos Flexibles.	15

1.5.- Métodos de Diseño de Pavimentos Flexibles.....	18
1.6.- Esfuerzos Producidos en los Pavimentos Flexibles.....	20
1.7.- Deterioros de los Pavimentos Flexibles.....	24
CAPITULO 2	
- Mezclas Asfálticas.....	40
2.1.- Introducción.....	40
2.2.- Definición.....	41
2.3.- Tipos de Mezclas Asfálticas.....	42
2.4.- Materiales Utilizados.....	43
2.4.1.- Asfalto.....	43
2.4.2.- Agregado.....	52
2.5.- Características y Comportamiento de la Mezcla.....	59
2.5.1.- Densidad.....	60
2.5.2.- Vacíos de Aire.....	60
2.5.3.- Vacíos en el Agregado Mineral.....	60
2.5.4.- Contenido de Asfalto.....	61
2.6.- Diseño de Mezclas.....	62
2.7.- Métodos de Diseño.....	67
2.8.- Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas.....	75
2.9.- Evaluación de la Superficie de Rodamiento.....	75
CAPITULO 3	
- Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas.....	78
3.1.- Antecedentes.....	78
3.2.- Deformaciones Permanentes.....	84
3.3.- Tipos de Deformaciones Permanentes.....	85
3.3.1.- Deformación Mecánica.....	86
3.3.3.- Deformación Plástica.....	87

3.3.2.- Deformación por Consolidación.....	88
3.4.- Proceso de Formación de Roderas.....	88
3.5.- Causas que Intervienen en la Formación de Roderas.....	92
3.6.- Equipos para Medir las Deformaciones Plásticas.....	104
CAPITULO 4	
- Estudio Reológico.....	109
4.1.- Antecedentes.....	109
4.2.- Métodos de Caracterización Reológicos.....	110
4.2.1.- SUPERPAVE	111
4.2.2.- SUPERPAVE Refinado	118
4.2.3.- Viscosidad a Corte Cero.....	120
4.2.4.- Creep Repetido.....	122
4.3.- Descripción de los Asfaltos Utilizados	127
4.4.- Análisis Reológico de los Asfaltos Utilizados.....	128
4.5.- Comentarios del Análisis Reológico.....	134
CAPITULO 5	
- Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.....	136
5.1.- Introducción.....	136
5.2.- Pruebas de Simulación.....	138
5.3.- Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH	144
5.4.- Descripción del Equipo.....	146
5.5.- Procedimiento de la Prueba.....	150
5.6.- Resultados Obtenidos con los Ensayos.....	151
CAPITULO 6	
Pruebas de Laboratorio	152
6.1.- Parámetros a Seguir en la Investigación.....	152

6.2.- Caracterización de Materiales	154
6.2.1.- Agregados Pétreos	154
6.2.2.- Asfaltos.....	159
6.3.- Fabricación de Probetas	162
6.4.- Pruebas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.....	167
CAPITULO 7	
- Resultados de las pruebas.....	171
7.1.- Propiedades Físicas del Agregado Pétreo	171
7.2.- Propiedades Físicas de los Asfaltos Empleados	173
7.3.- Pruebas en la Pista de Ensayo UMICH.....	174
7.3.1.- Pruebas a 60° C.....	175
7.3.2.- Pruebas a Grado PG.....	178
7.3.3.- Pruebas a Temperatura de Falla.....	183
7.3.4.- Resultados de las Tres Temperaturas de Ensayo	186
7.4.- Correlación de Resultados Reológicos y de la Pista de Ensayo.....	187
Conclusiones	189
Bibliografía	192



Introducción.

Las carreteras son uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de un país; constituyen la principal forma de comunicación. Los caminos y carreteras propician la creación de cadenas productivas generadas por el tráfico de mercancías e impulsan el comercio y la producción industrial. Por tales motivos es más que evidente la importancia de construirlos con la calidad debida a fin de prolongar su vida útil permitiendo una circulación segura, cómoda y fluida; reduciendo de esta forma los costos de mantenimiento y operación.

Durante las últimas décadas, el transporte por carreteras ha experimentado un aumento de la tasa de vehículos y de las cargas por eje, además de haberse incrementado el nivel de demanda de los usuarios por mejores estándares de confort y seguridad. Por su parte, las administraciones han requerido desde siempre pavimentos con mayor vida útil, menores intervenciones de mantenimiento y un costo inicial razonable.

El uso de pavimentos flexibles presenta una amplia extensión en la construcción de las carreteras, esta tendencia se presenta tanto en México como a nivel mundial. Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles, no solo por los grandes volúmenes requeridos en su construcción, sino también porque constituyen la parte más costosa de los mismos. En este trabajo se da un mayor grado de importancia a la superficie de rodadura compuesta por mezclas asfálticas, ya que después de todo es la que presta el servicio y esta más en contacto con el usuario.

En la actualidad, de acuerdo a diversos estudios realizados por especialistas del medio, se consideran dos principales tipos de deterioros de los pavimentos flexibles: la fisuración (por fatiga o por efectos térmicos), y las deformaciones permanentes (conocidas como ahuellamientos o roderas). Se tiene bien sabido que a pesar de que los ahuellamientos generalmente no inducen a la falla estructural de un pavimento, si influyen de manera significativa en la disminución de la calidad de servicio, acortando su vida efectiva para la cual fue diseñado.

La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación "permanente" pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga; esta deformación es irrecuperable.

Actualmente en México, la construcción de pavimentos asfálticos y su resistencia, se ve afectada en gran medida por las deformaciones plásticas permanentes que ocurren en la capa superficial del pavimento (también llamada capa de rodadura). Este defecto está íntimamente relacionado con el método empleado en el diseño de las mezclas asfálticas (el cual es fundamental para garantizar el funcionamiento correcto durante la vida útil de un pavimento asfáltico), también los gradientes de temperatura medioambiental, las cargas por eje, la calidad de los materiales con los cuales se fabrican las mezclas asfálticas (agregados pétreos y asfaltos), el contenido de asfalto en las mezclas y podemos mencionar además, que en la etapa de construcción de los pavimentos asfálticos, afecta en gran medida la temperatura de las mezclas así como su compactación.

La estimación de la deformación permanente en materiales de pavimentación depende en gran medida de los métodos de ensaye y de los procedimientos que se utilizan para la fabricación de los especímenes de prueba. Estas variaciones en conjunto con la incertidumbre del tránsito y las condiciones ambientales hacen extremadamente difícil la predicción de la profundidad de las roderas.

Una de las líneas de investigación actual a nivel mundial, con el fin de predecir las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, es mediante el análisis reológico de los asfaltos; de donde se ha concluido gracias a diversos estudios, que al incorporar un modificador al asfalto se establecen estructuras internas de refuerzo a manera de un panal de abeja constituidas por el material adicionado que le brindan al material una mayor resistencia térmica, menor susceptibilidad ante procesos de envejecimiento y un aumento de la componente elástica. Es debido a esta asociación que los asfaltos modificados presentan propiedades mecánicas y reológicas superiores a los que no han sido modificados.

En el primer capítulo se trata la importancia de los pavimentos flexibles, se hace una descripción generalizada de ellos, además de un análisis muy superficial de sus componentes; en este capítulo se da una mayor importancia a definir los esfuerzos a los que están sometidos los pavimentos, así como de los principales tipos de deterioros que presentan.

El capítulo dos está destinado para describir el papel que juega en el desempeño del pavimento flexible, la carpeta asfáltica como superficie de rodamiento, se comentan las principales características que deben de poseer los componentes de las mezclas asfálticas y también se describen los procedimientos para el diseño de mezclas asfálticas de hoy en uso.

En el presente trabajo se pone especial énfasis en el tema de la deformación permanente en la carpeta asfáltica visto como una problemática funcional y de seguridad para el usuario, por lo que se destina un capítulo en especial en donde se tratan aspectos relacionados con la importancia que este deterioro presenta en el diseño de pavimentos flexibles. Se abordan también los principales factores que propician la formación de roderas en el pavimento, problema del que tanto adolecen los pavimentos asfálticos de nuestra infraestructura carretera.

En el cuarto capítulo, se presentan los métodos propuestos actualmente para evaluar las características reológicas de los asfaltos, métodos con los que se pretende sustituir la

metodología actual de clasificación de ligantes asfálticos SUPERPAVE, además se realiza un estudio reológico a los asfaltos modificados de mayor uso comercial en México.

En el quinto capítulo se toca el tema de la evaluación de la deformación de la mezcla asfáltica en el laboratorio mediante ensayos de simulación como los que se llevan a cabo mediante dispositivos de ruedas cargadas (wheel tracking testers). Se describen los principales dispositivos de ruedas cargadas de mayor uso en el mundo y se describe el equipo diseñado y construido por el departamento de vías terrestres de la UMSNH, conocido como Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Lo relacionado con la caracterización de los materiales, fabricación de las probetas y el desarrollo de los ensayos realizados en la pista de ensayo, se tratan en el capítulo 6.

Dentro de las pruebas realizadas a las mezclas asfálticas, se encuentra la evaluación de la deformación permanente, mediante el ensayo de pista UMICH, el cual es un dispositivo de rueda cargada que se ha construido, para adoptar criterios de aceptación y rechazo en actividades del control de calidad, así como prueba complementaria en el diseño de mezclas asfálticas.

En el séptimo capítulo se describe el comportamiento observado en la experimentación y se discute con interés los resultados obtenidos en lo referente a los ensayos realizados, además se presentan algunos comentarios acerca de las correlaciones encontradas, en cuanto a las características reológicas de los asfaltos y la evaluación de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas por medio del ensayo de pista.



Objetivos.

Objetivo General.

Para la presente investigación se planteó como objetivo general, el estudio, análisis y evaluación de las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, para comprobar porque son consideradas como uno de los principales deterioros en los pavimentos flexibles, y la forma en que este se ve reflejado en la disminución de la calidad de servicio de las carreteras, en todo camino, que se encuentre en servicio. La finalidad de este objetivo es, ampliar el conocimiento general acerca del tema, y presentar un razonamiento adecuado de este. Se pretende cumplir este objetivo mediante el análisis de la caracterización reológica de los asfaltos y el estudio de las deformaciones plásticas mediante un ensayo de simulación; la caracterización reológica se evalúa mediante cuatro métodos distintos y las pruebas se realizan en la pista ensayo de laboratorio UMICH.

Objetivos Particulares.

Debido a los grandes alcances que se pretenden tener con esta investigación, el objetivo general no abarca la total extensión de los parámetros aquí analizados; motivo por el cual nos vimos en la necesidad de plantear una serie de objetivos específicos para cada situación especial en estudio, estos objetivos se definieron como particulares, y son los siguientes:

- 1.- Introducir una visión más amplia de las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, explicando su origen y proceso de formación; además del análisis de los factores que las ocasionan, y de los métodos existentes para evaluarlas.
- 2.- Revisar y comparar las principales propuestas que actualmente se desarrollan, para la caracterización reológica de los asfaltos; en cuanto a evaluar la resistencia a las deformaciones permanentes se refiere.
- 3.- Caracterizar reológicamente los asfaltos modificados de más común empleo en México, y establecer las diferencias entre ellos por cada uno de los métodos de análisis; para poder comprobar si mediante estos se pueden predecir la susceptibilidad de los asfaltos ante las deformaciones plásticas.
- 4.- Evaluar mediante la pista de ensayo de laboratorio UMICH, las deformaciones plásticas que se presentan en mezclas fabricadas con características similares, variando tan solo dos parámetros; el tipo de asfalto (caracterizados reológicamente) y la temperatura de ensayo.
- 5.- Verificar si existe una correlación entre los resultados obtenidos por medio de la caracterización reológica de los asfaltos y la pista de ensayo UMICH en las mezclas asfálticas.
- 6.- Comprobar si la metodología SUPERPAVE, empleada en México para clasificar los ligantes asfálticos, los evalúa de forma correcta, apuntando un especial interés hacia los asfaltos modificados.



Capítulo 1.

Pavimentos Flexibles.

1.1.- Antecedentes.

Las carreteras son uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de un país; constituyen la principal forma de comunicación. Los caminos y carreteras propician la creación de cadenas productivas generadas por el tráfico de mercancías e impulsan el comercio y la producción industrial. Por tales motivos es más que evidente la importancia de construirlos con la calidad debida a fin de prolongar su vida útil permitiendo una circulación segura, cómoda y fluida; reduciendo de esta forma los costos de mantenimiento y operación.

Los primeros caminos eran simples huellas formadas por animales silvestres; posteriormente cuando el hombre comenzó a utilizar animales para transportar sus cosas, las huellas se ensancharon, lo mismo sucedió al colocar ruedas debajo de las cargas, lo cual no impidió que en tiempo de lluvias esas vías se convirtieran en lodazales intransitables; esto originó la idea de proteger los caminos con empedrados, para a continuación efectuar la planeación de nuevas vías (H. Wright, J. Paquette).

Las mejores evidencias que se tienen de un alto grado de desarrollo de los caminos, provienen desde las civilizaciones clásicas de Medio Oriente, Egipto, China y de las civilizaciones antiguas de América. El imperio romano ofrece quizá el mejor ejemplo en el sentido moderno de cómo una red caminera bien construida y conservada ayudó a la conquista y mantenimiento de un dominio universal de la época; los pavimentos romanos consistían en grandes bloques de piedras acomodadas, directamente apoyadas sobre el terreno natural, que sorprendentemente se encuentran bien conservadas en la actualidad.

El imperio napoleónico es otro claro ejemplo de la importancia de los caminos; aquí es importante señalar que el constructor francés Tressaguet hizo con su labor más incluso que las tropas

imperiales; fue el primero en construir los pavimentos por capas, ordenadas según el tamaño de sus partículas constitutivas.

No obstante el verdadero, auge de la construcción de los pavimentos se tuvo con la aparición del automóvil y demás vehículos de carga y de transporte, hasta inclusive con la presencia y desarrollo de la aviación, con las características que hoy se conocen. (P. Garnica, J. Chávez, 2004)

En México una de las épocas en que la red carretera nacional comenzó a formarse fue de 1920-1930, creciendo a un ritmo relativamente moderado, donde la motivación principal de la planeación fue, la integración sociopolítica de la nación. En esta etapa se construyeron principalmente los enlaces carreteros que unen la capital nacional con las capitales estatales, después estas con las principales ciudades de sus estados y con otras capitales estatales. De esta manera se logró una integración nacional.

Entre 1950 y 1970 la red carretera evolucionó a un ritmo acelerado, si consideramos que la primer etapa fue donde se desarrolló la red principal y básica, a esta segunda etapa la podemos denominar como una red alimentadora en gran parte rural y capilar, a fin de lograr un movimiento más eficiente y de mayor penetración en el territorio nacional.

En décadas posteriores surgió lo que podría considerarse como una tercera etapa, donde el énfasis principal de la construcción se puso en carreteras muy modernas de altas especificaciones, frecuentemente de cuatro y más carriles. No hay que decir que la delimitación de las tres etapas mencionadas anteriormente no ocurrió ni ocurrirá en forma contundente. A lo largo de toda la historia reciente de México ha continuado la construcción de carreteras de forma más tradicional, de tránsito libre y dos carriles, inclusive autopistas modernas.

La extensión actual de carreteras en la República Mexicana es de 333,247 km aproximadamente, los cuales se dividen en: Carreteras de la red federal, tanto de cuota como libre con una extensión total de 47,366.5 km. Las redes estatales de cuota y libres con una extensión de 65,138.1 km; la red de caminos rurales con una extensión de 160,185.1 km y finalmente el conjunto de brechas mejoradas con una extensión de 60,557.3 km. El conjunto de la red de carreteras, soporta la mayor parte de flujo de transporte de pasajeros (98.5 %) y más del 58.5 % del movimiento terrestre de carga.

Obviamente en las etapas antes mencionadas se presenta casi a la par un cambio significativo en el transporte y sus características, debido a que la economía sufrió una transformación muy importante que fue haciendo aparecer una estructura industrial creciente, hasta alcanzar niveles trascendentes, de manera que una economía domestica, se fue convirtiendo en una economía necesitada de recurrir a la exportación de bienes para poder seguir con su desarrollo. Esto equivale a decir que el transporte como fenómeno económico fue adquiriendo una importancia cada vez mayor, lo que implica que una actividad que anteriormente se centraba en comunicar se transforma ahora en un quehacer mucho más complejo, dentro de una actividad que evoluciona constantemente, siempre con la premisa de lograr un transporte cada vez más barato, más rápido y más seguro.

Los cambios descritos anteriormente se fueron desarrollando al mismo tiempo que se presentaban cambios de gran relevancia en los vehículos carreteros usados. Si en 1950 el vehículo más pesado que podía llegar a circular por las carreteras nacionales podía llegar a 7 u 8 toneladas, en la actualidad es usual ver circular unidades cuyo peso bruto supera las 60. A la vez, este incremento no solo se presentó en peso, sino también por igual en número; si en 1950 la carretera más importante de México podía tener 5 o 6,000 vehículos diarios, de los cuales un 10 % eran camiones de carga, hoy es posible contemplar en la red básica de carreteras mexicana con 3 o 4 veces mayor número de vehículos, además de que la proporción de vehículos de carga aumento notablemente, hasta niveles de 30 o 40 % del tránsito diario, en este sentido México es uno de los países de mayor proporción de vehículos de carga dentro del flujo general.

De forma muy clara se entiende que lo expresado anteriormente nos conduce a deducir que los vehículos de antaño ejercían esfuerzos superficiales sobre los pavimentos, mucho menores que los actuales, dichos esfuerzos superficiales disminuían mucho más rápidamente con la profundidad, de forma que en un pavimento típico de entonces era relativamente exigida una capa superior del orden de 30 o 40 cm de espesor; los vehículos actuales, con esfuerzos mucho mayores llegan a duplicar esta profundidad de influencia.

Como consecuencia de aquella situación, los pavimentos que se construían en ese entonces, se hacían con materiales que hoy no podemos considerar más que inadecuados, los materiales eran frecuentemente tan endebles que se consideraba que el agua y sus efectos eran los principales enemigos de los ingenieros de caminos, pues convertían en altamente deformables las secciones estructurales.

Muchos de esos caminos hoy en día tienen funciones mucho menos relacionadas en cuanto al transporte nacional más importante, pues en buena parte han sido substituidos por carreteras más modernas; en otros casos los caminos han sido reforzados estructuralmente, tan solo superficialmente y por ello presentan hoy un serio problema de conservación, ya que los modernos camiones transmiten esfuerzos a las capas inferiores no reforzadas causando grandes deformaciones en las reparaciones superficiales, en periodo muy corto de tiempo.

El gran incremento del transporte nacional en número y peso de los vehículos presenta entonces nuevas condiciones, considerando una gran variedad de factores, que han de ser tomados en cuenta por los actuales diseñadores y constructores de pavimentos. Seleccionando de esta gran variedad las características que más se asemejen a las condiciones particulares que un pavimento experimentará en servicio.

Como último punto de estos antecedentes es importante señalar, que la situación actual de nuestro país muestra un evidente retraso en lo que respecta al estado de la red federal, y en menor medida en la red de cuota, por lo que se requiere de un mantenimiento integral de estas dos redes. La razón es la creciente necesidad de comunicaciones por la globalización y la participación de México en tratados comerciales con Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea y Japón.

Motivo por el cual se planteo el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes, que establece que "Las características de nuestro país implican, para los sistemas de transporte, la existencia de demandas muy fuertes y crecientes para cubrir las variadas necesidades de desplazamientos de cargas y pasajeros en todo el territorio nacional, para poder contribuir así de manera activa a la integración nacional y a la articulación de cadenas productivas, aspectos fundamentales para fortalecer la productividad de las industrias y la competitividad de la economía en su conjunto." (SCT, 2001)

1.2.- Definición y Clasificación de un Pavimento.

Los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas unas sobre otras, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, compuestas de diferentes materiales, adecuadamente compactados, estas se apoyan sobre una terracería obtenida por el movimiento de tierras.

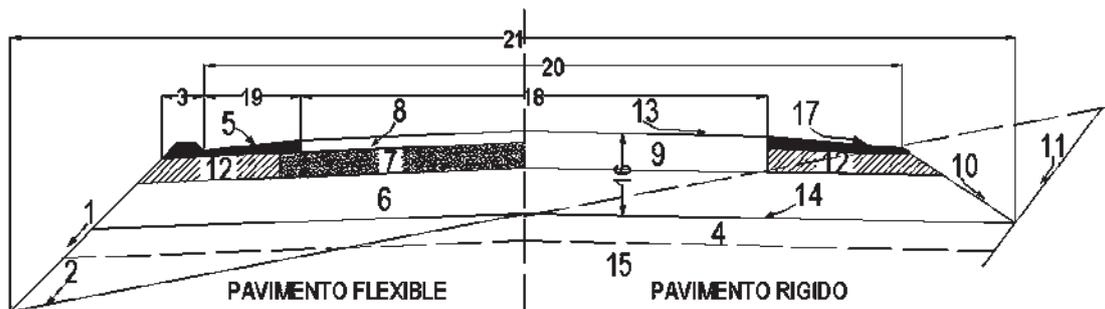


Figura 1.1 Estructura típica de un pavimento (flexible y rígido).

En la Figura 1.1 se tienen los siguientes elementos constitutivos, que conforman la sección de construcción de un camino:

- | | |
|---|---|
| 1. Talud en terraplén | 6. Subbase |
| 12. Material de base en el acotamiento | 17. Superficie asfáltica para el acotamiento |
| 2. Nivel de la superficie natural de terreno | 7. Base granular |
| 13. Bombeo de la corona | 18. Carriles de circulación, ancho de calzada |
| 3. Bordillo | 8. Carpeta asfáltica |
| 14. Nivel de la subrasante | 19. Acotamientos |
| 4. Capa subrasante | 9. Losa de concreto hidráulico |
| 15. Nivel de las terracerías | 20. Ancho de corona |
| 5. Material asfáltico en el acotamiento lateral | 10. Cuneta de la sección en corte |
| 16. Estructura del pavimento | 21. Ancho total del camino |
| | 11. Talud de la cuneta en la sección en corte |

De acuerdo a la figura 1.2, podemos decir que, un pavimento es la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodamiento de una obra vial, siendo su finalidad la de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente al tránsito, al interperismo producto de los agentes naturales y a cualquier otro agente que lo amenace. Además de tener la función estructural de transmitir de manera adecuada los esfuerzos a la subrasante, de forma que tan solo le llegue una pequeña parte de ellos y estos no la puedan deformar.

Un pavimento es un elemento estructural monocapa o multicapa, apoyado en toda su superficie, diseñado y construido para soportar cargas estáticas y/o móviles durante un periodo determinado, en el que necesariamente tendrá que recibir algún tipo de tratamiento para prolongar su vida de servicio. Por estar conformado por una o varias capas de espesores y calidades diferentes que se colocan sobre el terreno preparado para resistirlo, su función mas importante es proporcionar una superficie resistente al desgaste y suave al deslizamiento, así como un cuerpo estable y permanente, bajo la acción de las cargas.

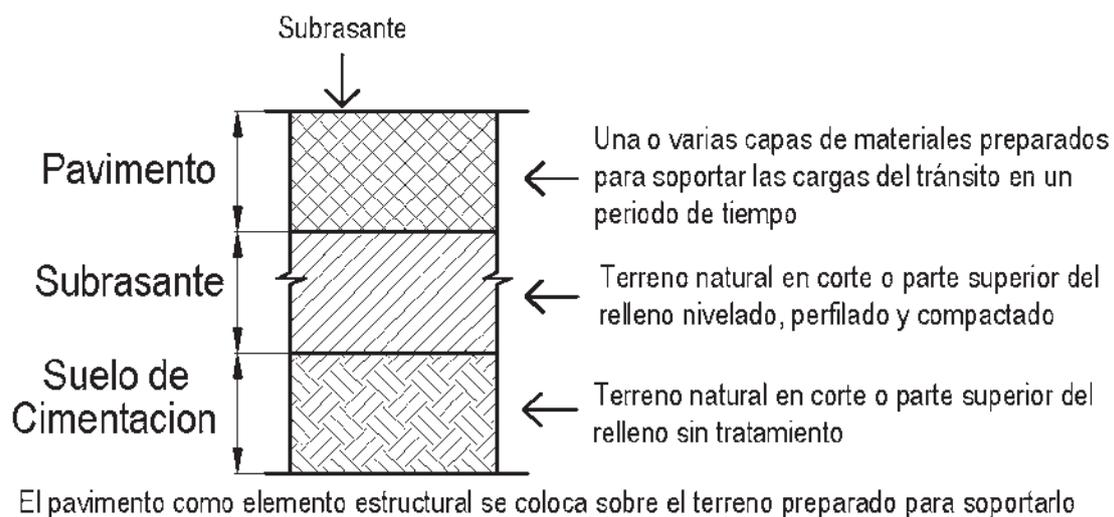


Figura 1.2 Esquema de la estructura del pavimento.

En base a la figura 1.2, podemos adoptar una clasificación de los pavimentos en términos muy generales, de acuerdo a algunas características que estos presenten, las cuales pueden ser:

- ❖ De acuerdo a los materiales empleados para su construcción: estabilizados, empedrados y aglomerados, mezclas asfálticas o mezclas de cemento Portland.
- ❖ Su estructura: simples o reforzados.
- ❖ El uso al que estarán destinados a lo largo de su vida de servicio: urbanos, industriales, carreteros, aeropistas, etc.

- ❖ El periodo de vida para el que fueron diseñados y construidos: temporales o permanentes.
- ❖ La forma en que distribuyen la carga al terreno: flexibles o rígidos.

Sin embargo tradicionalmente los pavimentos se clasifican de acuerdo a la última descripción, que además de tomar como parámetro la distribución de las cargas, también considera las características de las capas de que está constituido el pavimento, en relación a esto tenemos:

- ❖ Pavimentos flexibles: constituido por capas granulares y están cubiertas por un tratamiento superficial o por lo menos, por una capa de mezcla asfáltica.
- ❖ Pavimentos semiflexibles: compuestos por una base y una carpeta asfálticas, estando constituidos por una intermedia y otra de rodadura; cuentan con una sub-base granular.
- ❖ Pavimentos semirrígidos: están constituidos por una capa tratada por un ligante hidráulico, la sub-base generalmente es de material granular y la superficie de rodamiento está compuesta por una mezcla asfáltica.
- ❖ Pavimentos rígidos: están formados por una losa de concreto hidráulico colocada directamente sobre la subrasante, o sobre una capa de sub-base granular o estabilizada, la losa de concreto hidráulico actúa como superficie de rodamiento.

En este trabajo nos centraremos en el estudio de los pavimentos flexibles, debido a que son los que tienen mayor uso en las carreteras de México, en comparación con los pavimentos rígidos, algunas de las razones por las cuales se dan estas tendencias podrían ser: el menor costo de construcción, la mayor facilidad para realizar conservaciones periódicas, entre otras.

1.3.- Composición de un Pavimento Flexible.

1.3.1.- Terracerías.

Pueden definirse como los volúmenes de material que se extraen o que sirven de relleno en la construcción de una vía terrestre. También conocidas como "Infraestructura", las terracerías son la estructura donde se apoya el pavimento, de ahí la importancia de mencionarlas, además de describir algunas de sus funciones más importantes y mencionar sus principales características; las terracerías se conforman al igual que los pavimentos de diversas capas las cuales mencionaremos a continuación:

- ❖ Cuerpo del terraplén. La finalidad de esta parte de las terracerías son :
 - a) Alcanzar la altura necesaria para satisfacer las especificaciones geométricas en lo relativo a la pendiente longitudinal principalmente.
 - b) Resistir las cargas del tránsito transmitidas por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos en forma adecuada al terreno natural, de acuerdo a su calidad.

Los materiales empleados para construir el cuerpo del terraplén deben tener un VRS mayor a 5 % y sus tamaños máximos pueden ser hasta de 75 cm; estos se dividen en materiales compactables y materiales no compactables.

Un material es compactable cuando, después de disgregarse, se retiene menos del 20 % en la malla de 7.5 cm (3") y menos de 3 % en la malla de 15 cm (6"). Los materiales no compactables carecen de estas características.

- ❖ Capa Subrasante. Es la capa de cimentación, la estructura que soporta finalmente todas las cargas que corren sobre el pavimento, en algunos casos, esta capa estará formada solo por la superficie natural del terreno.

Características de la subrasante:

1. Espesor de la capa 30 cm mínimo.
2. Tamaño máximo 7.5 cm (3")
3. Grado de compactación 95 % del PVSM.

Las principales funciones de esta capa son:

- a) Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son suministradas por el pavimento.
- b) Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.
- c) Evitar que los materiales finos plásticos que formen el cuerpo del terraplén contaminen al pavimento. El tamaño de las partículas debe ser intermedio entre los finos correspondientes al cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento.
- d) Evitar que las terracerías, cuando estén formadas principalmente por fragmentos de roca, absorban el pavimento. En este caso la granulometría del material deberá ser intermedia entre los fragmentos de roca del cuerpo del terraplén y los granulares del pavimento.

- e) Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- f) Uniformar los espesores de pavimento, sobre todo cuando varían mucho los materiales que conforman la terracería.
- g) Economizar los espesores de pavimento, en especial cuando los materiales de las terracerías requieren un espesor grande.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la línea subrasante del proyecto geométrico, la cual debe de cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura para las terracerías y por lo tanto su espesor, que en ocasiones es mayor que el necesario en la estructura. En el proyecto geométrico de la subrasante económica es preciso tomar en cuenta:

- Las especificaciones de la pendiente longitudinal de la obra.
 - Que la subrasante tenga la altura necesaria, a fin de que el agua capilar no afecte el pavimento.
 - Que la subrasante provoque los acarrees más económicos posibles.
- ❖ Capa Subyacente. Esta capa se coloca cuando el tránsito que va a operar sobre el camino es mayor a 10,000 ejes equivalentes en su vida útil, se coloca sobre el cuerpo del terraplén por debajo de la subrasante, se constituye de material compactable y su espesor generalmente es de 50 cm.

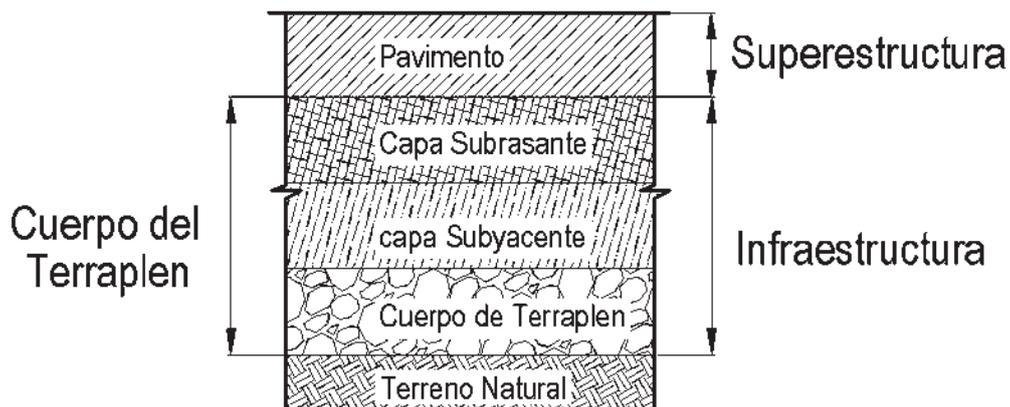


Figura 1.3 Sección geométrica tipo de una terracería ubicada en terraplén.

1.3.2.- Sub-base.

Se ubica por debajo de la base y por encima de la subrasante, su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme. Las características de los materiales que la constituyen se encuentran seleccionados entre la calidad intermedia de la base y la subrasante. Esta capa puede no ser necesaria en el caso de subrasantes granulares de alta capacidad de soporte.

Una de las funciones de esta capa es de carácter económico, debido a que se usa para disminuir el espesor de la base (material más costoso). Su función estructural es la de transmitir los esfuerzos de manera adecuada hacia la subrasante. Otra de sus funciones es de servir de transición entre el material de base más o menos grueso y la propia subrasante, generalmente formada por materiales más finos. La sub-base, más fina que la base, actúa como filtro de esta e impide su incrustación en la subrasante.

Una función más que mencionaremos de la sub-base es la de actuar como dren para desalojar el agua que se infiltre al pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base.

1.3.3.- Base.

Se localiza por debajo de la superficie de rodamiento, es una capa de muy alta estabilidad y densidad. Su principal propósito es el de distribuir o repartir los esfuerzos creados por las cargas rodantes que actúan sobre la superficie de rodamiento para que los esfuerzos transmitidos a la sub-base no sean tan grandes que den por resultado una deformación excesiva de la subrasante.

La base debe ser también de tales características que no sea dañada por el agua capilar o por la acción de las heladas, ya sea que actúen en forma separada o conjunta; los materiales con los que cuente la localidad se utilizarán ampliamente en su construcción, debido a que los materiales preferidos para la construcción de esta capa, se localizan en grandes variedades de forma notable en todo el país. Desde el punto de vista económico la base permite reducir el espesor de la carpeta que es más costosa.

1.3.4.- Superficie de Rodamiento.

Generalmente constituida por una mezcla asfáltica, puede ser fabricada de diferentes características dependiendo del tránsito, tipo de carretera, condiciones climáticas, etc, o por un tratamiento superficial; debe proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura, con color y textura convenientes además de resistir los efectos abrasivos del tránsito. Además, debe ser una capa prácticamente impermeable, constituyendo una protección para la base. Su principal función estructural es la de absorber los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. Desde el punto de

vista del objetivo funcional del pavimento, es el elemento más importante; además de ser la parte más costosa de este.

1.4.- Tipos de Fallas en los Pavimentos Flexibles.

Debido a la importancia que las carreteras tienen dentro de la economía de un país, en gran medida por que los costos de transportes de viajeros y mercancías están asociados a las condiciones de servicio que presenten estas, condición que se ve afectada debido a los deterioros que presenten los pavimentos; es fundamental mantener las características de las carreteras de la mejor manera posible, para evitar elevar los costos de operación de los vehículos que transitan por ellas.

Las características de toda carretera ya sea de construcción nueva o después de una reparación, se van degradando con el transcurso del tiempo. Son diversos factores los que intervienen y determinan este proceso de deterioro. Por una parte se encuentran los factores relacionados directamente con las características del propio pavimento como pueden ser los espesores, los materiales utilizados en su fabricación y el proceso constructivo, este conjunto de factores los podemos considerar como pasivos del proceso de deterioro. Por otra parte tenemos los factores denominados activos, considerados como los verdaderos causantes del deterioro, que son el tránsito y los factores ambientales.

Los factores activos de deterioro son dos variables complejas y difíciles de definir, que dependen de un conjunto de diversos elementos, tenemos que el tránsito esta unido al numero de ejes, a la carga por eje, a la velocidad de circulación de los vehículos, a la regularidad superficial del pavimento, etc.

Los ejes actúan sobre el pavimento transmitiendo una solicitud horizontal y otra vertical, lo cual se traduce en el tiempo en deterioros del pavimento, y se describirán con detalle más adelante; por ahora es suficiente mencionar, que se manifiesta principalmente en los siguientes tipos:

- ❖ Fisuración por fatiga.
- ❖ Desprendimiento o desintegración de los agregados.
- ❖ Deformaciones permanentes.
- ❖ Baches y peladuras.

Por otra parte, los factores ambientales someten a los pavimentos de las carreteras a una serie de agresiones externas que afectan la durabilidad de la carpeta asfáltica principalmente, tal es el caso de la radiación solar, las variaciones diarias y estacionales de la temperatura, la oxidación del asfalto producida por el aire y el agua, las heladas y las sales fundentes empleadas contra las mismas, entre otros.

Estos factores no siempre son tomados en cuenta en el dimensionamiento y conservación de los pavimentos, pero su efecto puede tener especial importancia en su deterioro ya que ayudan a que se presenten problemas, que se enlistan a continuación y se detallan más adelante.

- ❖ El desgaste de las mezclas asfálticas.
- ❖ La fisuración por esfuerzos térmicos.
- ❖ La fisuración y degradación superficial por efecto de las bajas temperaturas.
- ❖ La pérdida de capacidad de carga de la subrasante en épocas de deshielo o lluvias.

Las vías terrestres se proyectan y se construyen para que estén en servicio por un determinado número de años, llamado horizonte de proyecto de la obra. Al concluir este tiempo los caminos, se abandonan o se rescatan y reconstruyen con el objeto de aumentar el servicio por más tiempo, que es generalmente lo que sucede.

Cuando una obra vial se pone en servicio, debe presentar las condiciones óptimas para su operación, al transcurrir el tiempo, se deteriora por el uso, dificultándose así cada vez más la circulación del tránsito. Los deterioros pueden ser pequeños al principio, pero más adelante probablemente sean más serios y aceleren la falla del pavimento; por esto, una carretera requiere mantenimiento, conservación y rehabilitación oportuna, para que por lo menos cumpla con su vida de proyecto, proporcione un servicio adecuado y no presente una falla prematura.

Es necesario un análisis concienzudo para seleccionar el método y los materiales adecuados para la reparación de los pavimentos asfálticos. Ambos factores deben de ser considerados de acuerdo con las características locales, aunque en principio los trabajos de mantenimiento de pavimentos asfálticos siguen una misma secuela. El primer paso para proceder a la reparación es el de determinar la causa de la falla, para poder atacar el problema desde la raíz.

Las fallas del pavimento pueden ser, **estructurales** y **funcionales**, según los parámetros existentes para definirlos.

La falla estructural implica una destrucción de la estructura del pavimento o de uno o más de sus componentes, lo que los hace incapaces de soportar las cargas impuestas en su superficie por el tránsito y, en general, se debe a que el tránsito que ha soportado la estructura es mayor al que se calculó para su vida útil; si este es el caso, la estructura cumplió su cometido. Aunque en otras ocasiones, la falla estructural se presenta de forma prematura, es decir, mucho antes de terminar su periodo útil, entonces la falla se debe a una mala estructuración del pavimento, materiales deficientes o un mal drenaje entre otras causas.

La falla funcional es aquella que tienen los caminos cuando las deformaciones superficiales son mayores que las tolerables, causando esfuerzos sobre los vehículos y provocando ciertas

incomodidades al tránsito, depende del tipo de camino del cual se trate, pues se puede tener una superficie de rodamiento con deformaciones que son aceptables para caminos secundarios; pero inconvenientes para caminos de altas especificaciones.

El índice de servicio está ligado a este concepto de falla funcional. Este índice se estima en base en función del estado físico de la superficie de rodamiento, que el técnico califica con base a la cantidad de baches, deformaciones y grietas que presenta el camino o bien de acuerdo a la opinión de los usuarios.

El índice de servicio se califica en escala de 1 a 5; en caminos de primer orden, se requiere que este valor sea como mínimo de 2.5 a 3 para estar en condiciones aceptables, pero en las que ya conviene reacondicionarlos; para caminos secundarios, estas condiciones se tienen con una calificación de 2.

El criterio para obtener el índice de servicio varía de acuerdo con la dependencia encargada de construir los caminos de un país. En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes cuenta al respecto con el manual denominado Aplicaciones de los Conceptos de Calificación y Comportamiento a la Reconstrucción y Conservación de Carreteras, con base en el cual se califican las carreteras de la red nacional; para pavimentos de caminos nuevos, las fallas deben de estar consideradas en las curvas o criterios de proyecto.

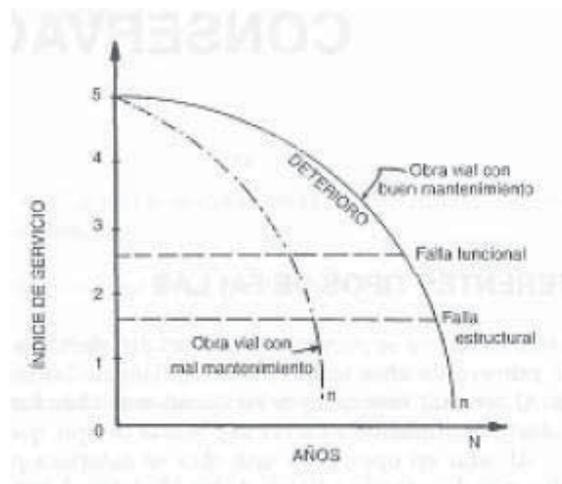


Figura 1.4. Esquema que muestra el deterioro de las obras viales a través del tiempo (fuente: SCT, 1998).

Cuando se registra la historia de un camino y se obtienen año con año los índices de servicio, se traza una curva como la mostrada en la figura 1.4, con la cual se conoce aproximadamente el tiempo en que la vía llegará a su falla estructural. Se pueden hacer diferentes rehabilitaciones, para aumentar su vida útil; aunque después de varios trabajos de este tipo, habrá un momento en que la estructura esté tan dañada que necesite de una reconstrucción.

Lo anterior se muestra en la figura 1.5, donde se indica que después de entrar en servicio, una obra se va deteriorando hasta llegar en "N" años a su falla estructural; si cuando se tiene una calificación de 2.5 se le rehabilita, aumenta su vida útil en "N" años más. Este ciclo se puede repetir en varias ocasiones; sin embargo, después de 4 o 5 rehabilitaciones, el daño causado a la obra es tal que lo más conveniente es una reconstrucción, pues la eficacia de la rehabilitación es cada vez menor, como se observa en la grafica.

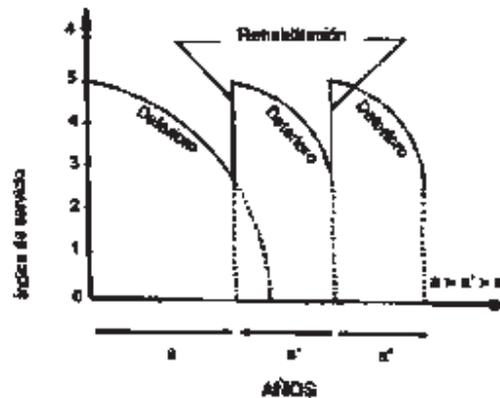


Figura 1.5 Esquema que muestra el efecto de las rehabilitaciones en la vida de una obra vial.
(fuente: SCT, 1998).

1.5.- Métodos de Diseño de Pavimentos Flexibles.

No cabe duda que en la actualidad la ingeniería de caminos se debate ante la urgente necesidad de mejorar los procedimientos de diseño de pavimentos, con el objeto 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.

Normalmente el diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos se basan en la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y de la manera en que se emplean las propiedades de los materiales.

La práctica actual del análisis y diseño de los pavimentos se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se basa en propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia, como lo es el Valor Relativo de Soporte (VRS). Aún las metodologías basadas en tramos de prueba de regresión de resultados, como lo es el método AASHTO actual, el cual se puede considerar como empírico en el sentido en el que su aplicación está rigurosamente restringida a las condiciones que se utilizaron para su calibración. A pesar de esto, desde hace mucho se han manejado conceptos mecanicistas como el Módulo de Resiliencia, pero solo como parámetro de cálculo que se correlaciona con el VRS, y no como una propiedad fundamental del material. En el mejor de los casos existen métodos que se les llaman semi-empíricos o empírico-mecanicistas,

porque ya consideran leyes de fatiga de los materiales en los cálculos de la vida útil del pavimento, por ejemplo podemos mencionar al método Shell o al del Instituto Norteamericano del Asfalto. Sin embargo la visión que se desea proyectar es la de llegar a métodos puramente mecanicistas.

El problema de la práctica actual es que el método, siempre estará delimitado por los tipos de suelo considerados, los métodos de construcción, las configuraciones vehiculares de la época, etc.

Las metodologías mecanicistas plantean tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología nos permitirá la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se puedan presentar y por lo tanto aumentar la confiabilidad en nuestros diseños.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de capa; las propiedades de los materiales que conformarán cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes; el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura; y el nivel de tránsito definido, ya sea en ejes equivalentes o preferentemente a través de su espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de lo que vamos a llamar las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad.

A partir de la respuesta estructural del pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el periodo de diseño, para los diferentes tipos de deterioro que se pudieran presentar; estos deterioros pueden ser agrietamientos por fatiga, agrietamientos térmicos, deformaciones permanentes y finalmente el nivel de regularidad medido a través del llamado Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Calculados los niveles de deterioro para el periodo de diseño, se comparan con los valores máximos permitidos del diseñador, que dependerá por supuesto del tipo de camino del que se trate. Para caminos de altas especificaciones, en especial para los caminos de cuota, las exigencias serán mayores.

Como se mencionó anteriormente, la principal ideal del método es la garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento, deformación permanente, regularidad superficial, etc, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

Por supuesto que la validación de los conceptos anteriores no es de aplicación inmediata, ya que se necesita entre otras cosas, de la disponibilidad de equipos modernos de laboratorio y campo que permitan la evaluación de las propiedades que son necesarias, pero sobre todo y es quizá lo más importante, se necesita de la calibración y validación de los modelos de deterioro. Esto significa que se necesita del monitoreo de tramos de pavimentos representativos en México, que permita la obtención de los coeficientes de ajuste necesario para poder predecir, con la confiabilidad necesaria, la evolución de los niveles de agrietamiento, deformación permanente, etc. Lo anterior necesita de la disposición de una base de datos representativa, con al menos cuatro o cinco años de mediciones.

1.6.- Esfuerzos Producidos en los Pavimentos Flexibles.

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular.

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

Un elemento de un pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian de posición con el tiempo conforme la carga avanza; el esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales.

La figura 1.6, muestra el esquema de una sección longitudinal de las capas de un pavimento, sobre la cual la carga se mueve a velocidad constante.

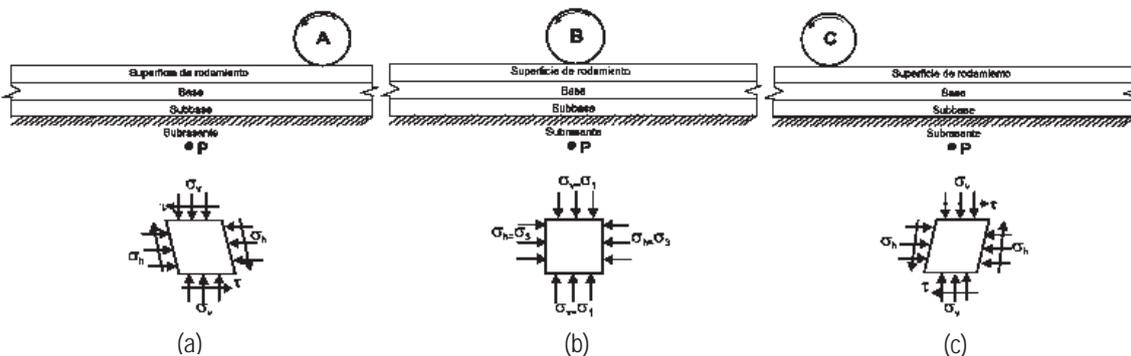


Fig. 1.6 Estado de esfuerzos en una sección longitudinal de un pavimento (fuente: Pandey et al, 1987).

El estado de esfuerzos experimentado por el punto P debido a la carga en el punto A, es de condiciones tales que en este punto actúan esfuerzos de tipo normal como esfuerzos cortantes; tal como lo podemos observar en la figura (a). Cuando la carga se desplaza hacia el punto B, los esfuerzos de tipo cortantes son nulos, actuando de esta forma tan solo esfuerzos de tipo normal, como se presenta en la figura (b). Al continuar con el recorrido de la carga esta se desplaza hasta el punto C, donde la condición de los esfuerzos cortantes es de sentido contrario en comparación con los experimentados en el punto A, como se observa en la figura (c).

Para caracterizar los esfuerzos producidos por el tránsito a un pavimento, una opción sería estudiar de forma independiente algunos aspectos específicos, ya que se ha demostrado a través de la experimentación su relación con los diferentes mecanismos de deterioro de los pavimentos, estos son:

- ❖ Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (tipo de eje, distribución de cargas por eje, número de ejes que circulan y número de repeticiones de carga).
- ❖ Forma geométrica de cada sollicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- ❖ Velocidad de los vehículos y tiempo sollicitación 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 que los vehículos transmiten al pavimento son inducidas por medio de las ruedas, por tal motivo es de vital importancia conocer el área de contacto de la rueda con el pavimento; asumiendo que la presión de contacto depende de la presión de inflado del neumático, como se indica en la figura 1.7, la presión de contacto es más grande que la presión de inflado del neumático, para presiones bajas de la llanta, debido a que la pared de la llanta está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y presión del neumático, deben de ser iguales a la fuerza debida a la presión de contacto; por el contrario para presiones de las llantas altas, la presión de contacto es más pequeña que la presión de la rueda, debido a que la pared de la llanta está en tensión. Sin embargo, generalmente se asume la presión de contacto 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 al lado de la seguridad. (Huang, 1993).

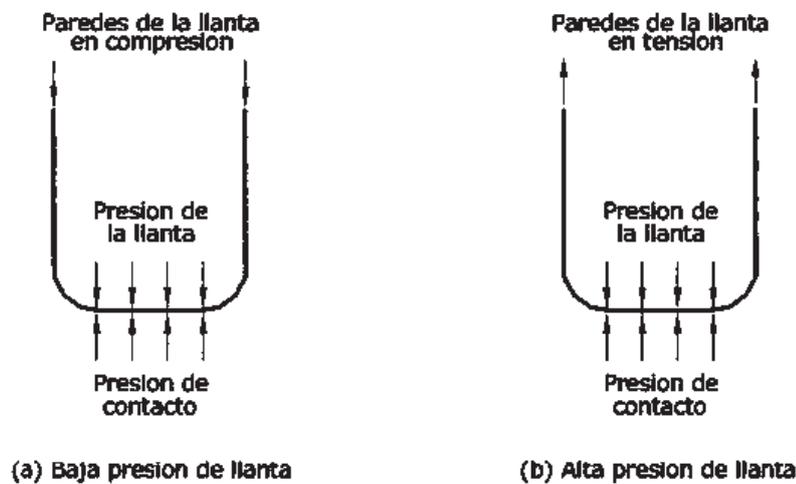


Figura 1.7 Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta (fuente: Huang, 1993).

Otro de los aspectos considerados es tomar en cuenta que los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de rueda, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento además de variar la forma de la huella, aparecen esfuerzos diferentes a los verticales, que son los que existen cuando el vehículo está en detenido o con un movimiento uniforme; por el contrario aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efecto de los movimientos del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Por otro lado los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan esfuerzos tangenciales, estos deben de ser resistidos por los 8-10 cm superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores. Por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas es proyectando, capas de rodadura cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan rupturas o deformaciones.

Es relevante también considerar que los efectos dinámicos de los vehículos se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo. En general, los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varía con la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 50 % superiores a los presentados

con carga estática; este aumento de cargas se refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de la rodada.

En la figura 1.8, se puede distinguir que cuando la rueda cargada avanza, se producen pulsaciones de los esfuerzos verticales y horizontales, que son acompañados de una doble pulsación del esfuerzo cortante con una señal contraria en el plano horizontal y vertical; se muestra la relación entre esfuerzo y tiempo. Como podemos observar a medida que la rueda cargada se aproxima a un punto específico del pavimento, el esfuerzo cortante se incrementa hasta llegar a un máximo para luego decrecer hasta un valor de cero, en ese momento el esfuerzo vertical es máximo; posteriormente se incrementa nuevamente, pero ahora con signo contrario hasta lograr un máximo negativo, para después decrecer y llegar a cero; describiendo con este comportamiento una onda senoidal completa.

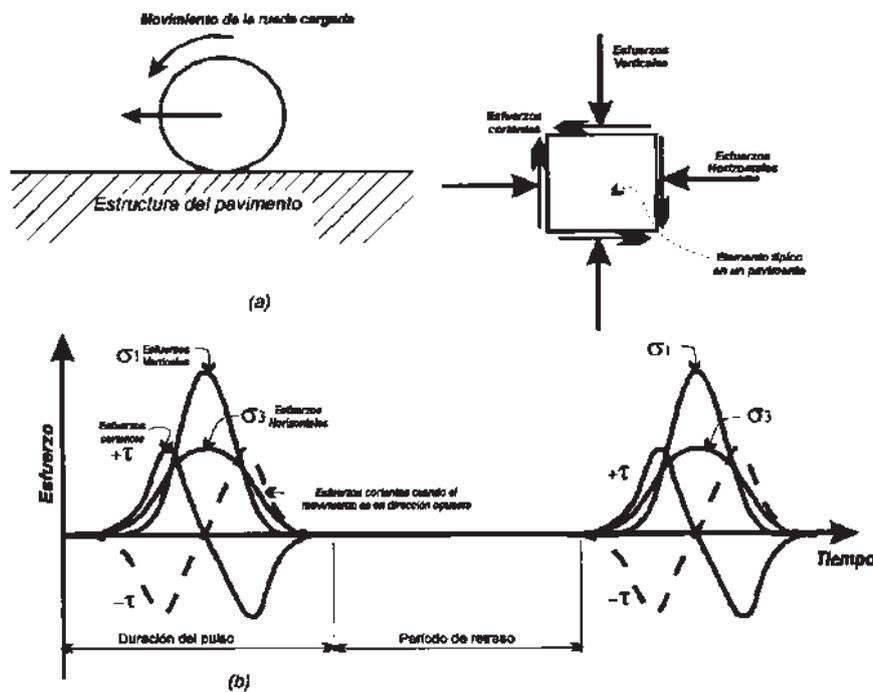


Figura 1.8 Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda cargada. (fuente: Pandey et al, 1987).

El estado de esfuerzos descritos anteriormente se presenta en forma repetida cuando el paso de los vehículos se hace constante, este proceso depende de la acumulación de los ejes equivalentes.

Se puede apreciar el desarrollo de los esfuerzos horizontales, verticales y cortantes originados por las cargas del tránsito. En base a esto se observa que el funcionamiento adecuado del pavimento depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales.

En los pavimentos, las deformaciones provocadas, por los diferentes estados de esfuerzos debidos al tránsito, interesan desde dos puntos de vista: por un lado las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla; y por otro porque es bien sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hallan inducido a un colapso estructural propiamente dicho. (Rico A, Del Castillo H, 1992).

1.7.- Deterioros de los Pavimentos Flexibles.

Una carretera es una estructura diseñada para soportar las cargas del tránsito, de forma similar a como se diseña una viga para soportar las cargas de un muro, por ejemplo.

Como tal estructura se debe reconocer que al decirnos, por motivos prácticos evidentes, por una estructura superficial, tipo losa apoyada, estamos desperdiciando estructura resistente.

En realidad las cargas, representadas principalmente por las ruedas de los vehículos pesados, circulan generalmente por unas zonas determinadas de la calzada, denominadas rodadas, y solo eventualmente abandonan estas zonas para realizar adelantamientos u otras maniobras esporádicas como las propias entradas o salidas de la carretera.

Este hecho que probablemente no es de gran utilidad para reducir la estructura del pavimento, si lo es para analizar las degradaciones que se producen en la carretera.

Parece obvio que las degradaciones situadas en esas zonas de las rodadas, son, en principio, debidas a las cargas del tránsito, mientras que las situadas en otras zonas, difícilmente pueden ser atribuibles a dichas cargas sino a otros problemas de la carretera en si.

Si se presentará el caso contrario de que una degradación no debida al tránsito se exhibiera en la zona de la rodada; en este caso, el efecto del tránsito hará que el deterioro de esa degradación sea mucho más rápido que si dicha degradación no estuviera situada en dicha zona.

Existen una serie de deterioros en los pavimentos asfálticos que se relacionan con una disminución apreciable de las características iniciales y que pueden afectar la capacidad estructural del pavimento, la mayoría de ellos se presentan en forma de fisuras o de deformaciones permanentes y por lo general suelen afectar a mas de una capa del pavimento.

1.7.1.- El problema de la Fisuración.

La fisuración no implica en un principio un problema para el usuario. Este no nota que una carretera esta fisurada hasta que su estado supone un deterioro tal que la superficie de la carretera se hace incomoda para la circulación por si misma.

Sin embargo, para el técnico responsable de la carretera supone desde su comienzo, una amenaza para el futuro del pavimento que no se puede despreciar.

Primero porque es una gran puerta abierta para que el agua, gran enemigo de las carreteras penetre hasta las capas inferiores afectando a la capacidad portante del pavimento y afectando su comportamiento futuro.

Segundo porque permite la intrusión de elementos duros e incomprensibles, cuando esta abierta por las deformaciones térmicas, que hacen que, al cerrarse la fisura por una bajada de las temperaturas, se produzcan tensiones entre los bordes de la fisura y los materiales incomprensibles que llegan a romper dichos bordes.

Tercero porque se crea una discontinuidad en el pavimento que empeora la distribución de tensiones en la zona. Es sobradamente conocido que una carga en el borde de una losa produce solicitaciones mayores que una carga interior. Por ello la aparición de una fisura supone que existe un borde más en la losa y que las tensiones debidas al tránsito se multiplican más en la zona.

Pero lo más importante de una fisura es que refleja una enfermedad del pavimento. Esta enfermedad debe diagnosticarse y corregirse, de una forma adecuada, de manera que no ponga en peligro la vida de la carretera.

1.7.2.- Deformación de la Superficie de la Carretera.

Otro hecho que se debe de tener en cuenta al interpretar las degradaciones de una carretera es el de observar si la superficie de la misma mantiene su regularidad transversal o no.

La existencia de hundimientos en la carretera es índice de que las capas granulares no son capaces de soportar las cargas del tránsito sin deformarse, ya que es muy difícil que un hundimiento apreciable pueda deberse a las capas de mezcla asfáltica generalmente de menor espesor. Por ello, al observar una carretera degradada, si mantiene la regularidad superficial, se puede pensar que el problema reside en las capas superiores, mientras que si la carretera esta deformada, las sospechas deben de recaer en las capas inferiores del pavimento.

Un caso aparte es el de las roderas de las carreteras. El primer análisis que se debe de realizar es determinar si la degradación realmente corresponde al problema denominado roderas o si, por el contrario, corresponde al hundimiento de la rodada.

En el primer caso, el problema esta relacionado a la capa de mezcla asfáltica que forma la capa de rodadura del pavimento. Esta capa, con un diseño o una compactación inadecuada, sufre deformaciones fuertes con el tránsito canalizado, lo que, unido al comportamiento mas plástico de la mezcla con temperaturas más altas, hace que se produzca un desplazamiento del material de la

zona de rodada a las zonas laterales, formándose un cordón de material desplazado característico, a los lados de dicha zona de rodada.

Tal y como se ha descrito es una degradación originada por un mal comportamiento de la mezcla asfáltica fabricada de manera adecuada y por lo tanto roderable con temperaturas altas y tránsito canalizado.

Otro problema distinto es el que se presenta cuando las capas granulares del pavimento o la subrasante, no poseen la capacidad de carga necesaria para soportar las cargas del tránsito. Esto provoca un hundimiento en las zonas de las rodadas, que es donde se producen las deformaciones verticales mayores en las capas granulares. Este hundimiento no lleva consigo la aparición de cordones laterales en los exteriores de la zona hundida, y si probablemente la fisuración en dicha zona, debido a que la mezcla asfáltica suele ser mucho más rígida en este caso que en el caso señalado anteriormente de deformación plástica de la mezcla asfáltica.

Como puede verse es necesario observar detalladamente una degradación de este tipo para conocer cual de los dos casos se esta produciendo e identificar por lo tanto la capa origen de los problemas.

1.7.3.- Tipos de deterioros de los Pavimentos Flexibles.

Los daños que se presentan en la estructura de un pavimento se pueden clasificar en cuatro categorías, además dentro de cada categoría existen diferentes tipos de deterioros que se originan por diversos factores, a continuación se presenta una descripción de cada uno de estos daños.

A. Fisuras.

- Piel de cocodrilo.

Corresponde a una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente localizadas en zonas sujetas a repeticiones de carga. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas; se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Ante la repetición de cargas de tránsito, las fisuras se propagan formando piezas angulares que desarrollan un modelo parecido a la piel de cocodrilo.

La fisuración en forma de piel de cocodrilo puede ser originada por un dimensionamiento insuficiente del pavimento o simplemente por haberse producido un despegue de la capa superior de mezcla asfáltica, por una mala puesta en obra del riego de adherencia.

En el primer caso en el que el deterioro se presenta en el conjunto de la estructura, además del deficiente dimensionamiento, influyen otros mecanismos como por ejemplo problemas de drenaje que afectan los materiales granulares, falta de compactación de las capas, subrasantes expansivas, entre otras.

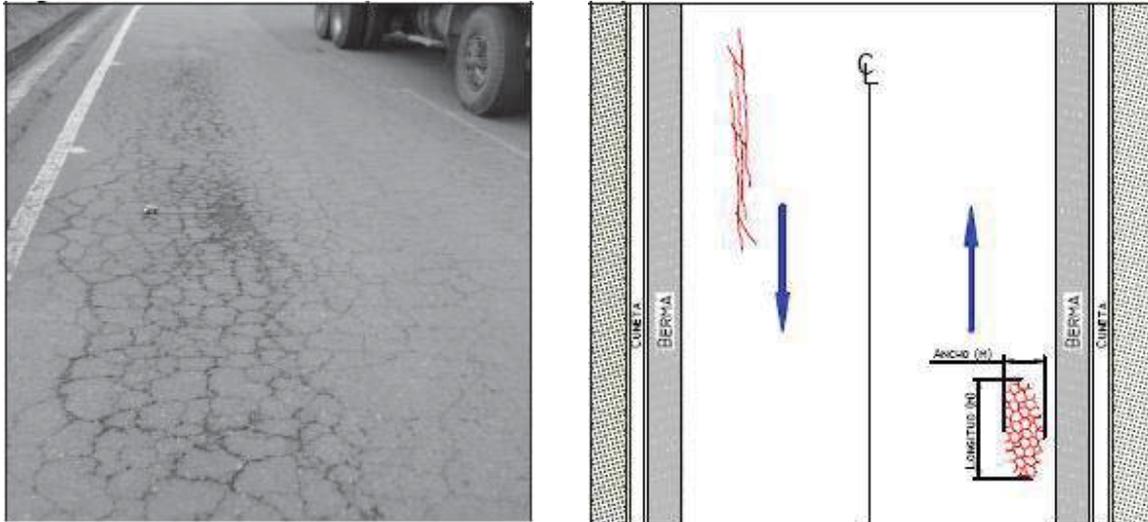


Figura 1.9 Fisuración en piel de cocodrilo (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

En el caso en el que la mezcla asfáltica se desprege, esta tiene que trabajar de forma independiente del resto, por lo que llega a la fatiga, aunque el resto del pavimento se encuentre en buen estado y con una capacidad de carga elevada.

Este fenómeno puede de forma progresiva o no, cuando se presenta, termina en destrucciones locales del pavimento, que comienzan por desprendimiento de la carpeta en lugares localizados y en la rápida degradación de los materiales granulares expuestos.

Es muy importante determinar, en el caso de que la fisuración venga originada por fatiga del pavimento en general, si la degradación esta muy extendida o si es solo local para determinar si es un problema generalizado o simplemente puntual que puede arreglarse con un buen saneo de las zonas malas.

Al estudiar este tipo de agrietamiento resulta muy importante determinar si se trata el caso de un fenómeno evolutivo; en general, los procesos de fisuración asociados a envejecimiento y fatiga de las capas asfálticas progresan de forma muy lenta, en cambio son muy rápidas las evoluciones relacionadas a deficiencia estructural o exceso de agua.

- Fisuras en bloque.

También es debida a la fatiga pero con una apertura de malla formada por la fisuración más amplia que en el caso anterior, con tamaños de bloques por encima de 25 por 25 centímetros.

Este deterioro difiere de la piel de cocodrilo en que esta última aparece en áreas sometidas a cargas, mientras que los bloques aparecen usualmente en áreas no cargadas. Sin embargo, es usual encontrar bloques que han evolucionado en piel de cocodrilo por acción del tránsito. Por otra parte, la piel de cocodrilo generalmente esta formada por bloques con más lados y ángulos agudos.

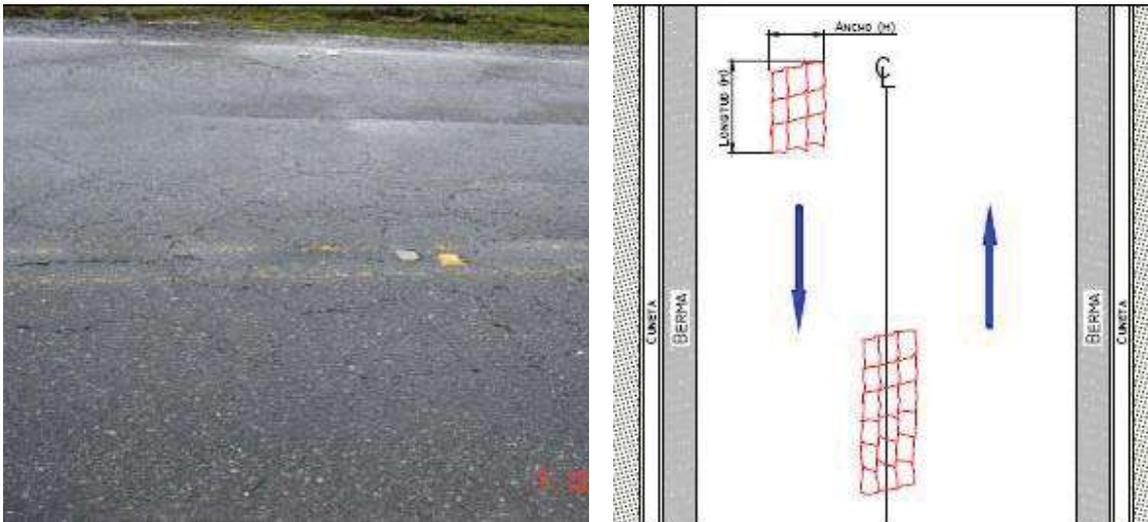


Figura 1.10 Fisuración en bloque (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Fisuras de borde.

Corresponden a fisuras con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada, se presenta principalmente por la ausencia de acotamiento, por la diferencia de nivel entre la calzada y el acotamiento, por la insuficiencia del acotamiento de soportar las tensiones producidas por el tránsito en la calzada o cuando el drenaje es deficiente y el acotamiento presenta un exceso de humedad.

La principal causa de este deterioro es la falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la carencia de bordillos, anchos de acotamientos insuficientes o sobrecarpetas que lleguen hasta el borde del carril y quedan en desnivel con el acotamiento; en estos casos la fisura es generada cuando el tránsito circula muy cerca del borde. Las fisuras que aparezcan por esta causa generalmente se encuentran a distancias entre 0.3 a 0.6 metros del borde de la calzada.

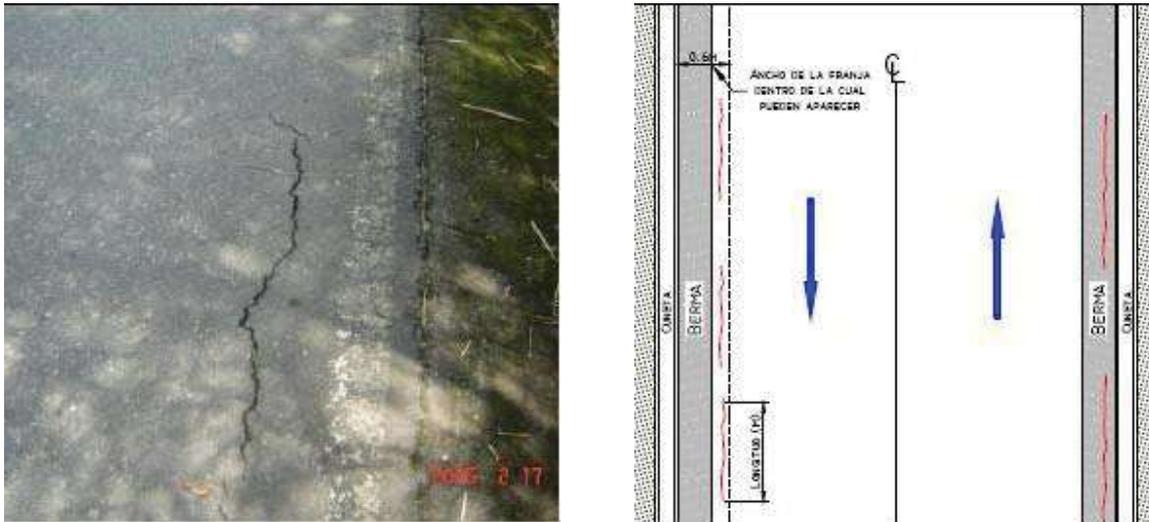


Figura 1.11 Fisuración de borde (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Fisuras Longitudinales.

La importancia y el origen de una fisura longitudinal en la carretera, dependerá de su situación relativa dentro de la calzada.

De hecho, una parte apreciable de las fisuras longitudinales en una carretera situadas fuera de las zonas de rodadas, tienen su origen en causas diferentes al agotamiento del pavimento por causas de las cargas del tránsito.

Las juntas originadas por juntas de trabajo mal realizadas o por falta de adherencia entre capas antes de compactar la capa superior, son bastantes frecuentes en las carreteras. También son frecuentes en pavimentos semi-rígidos las fisuras longitudinales de retracción formadas en las capas inferiores cementadas y reflejadas en la superficie del pavimento.

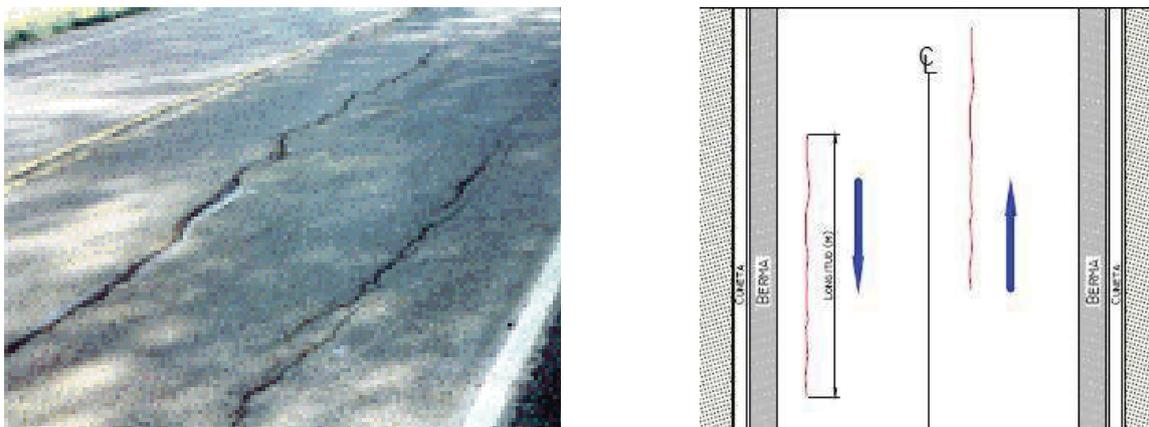


Figura 1.12 Fisuración longitudinal (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

En el caso de fisuras longitudinales situadas en la zona de la rodada, su origen puede ser debido a la falta de capacidad de carga del pavimento, como paso inicial a la fisuración de piel de cocodrilo. Agrietamientos como este pueden deberse a movimientos de las capas del pavimento que tienen lugar predominante en dirección horizontal, este fenómeno se puede presentar en la base, sub-base o en la subrasante.

Las fisuras longitudinales tienen un desarrollo en su deterioro, que comienza con ramificaciones, pérdida del material del borde de la fisura y formación de fisuras secundarias cerca de la principal.

- Fisuras transversales.

Las fisuras transversales pueden ser originadas por el tránsito o por otro tipo de causas, principalmente por asiento de terraplenes, por la diferencia de rigidez de la subrasante entre las zonas de contacto entre corte y terraplén, por fisuración térmica, por el reflejo de fisuras de capas profundas cementadas, por defectos de extendido, etc.

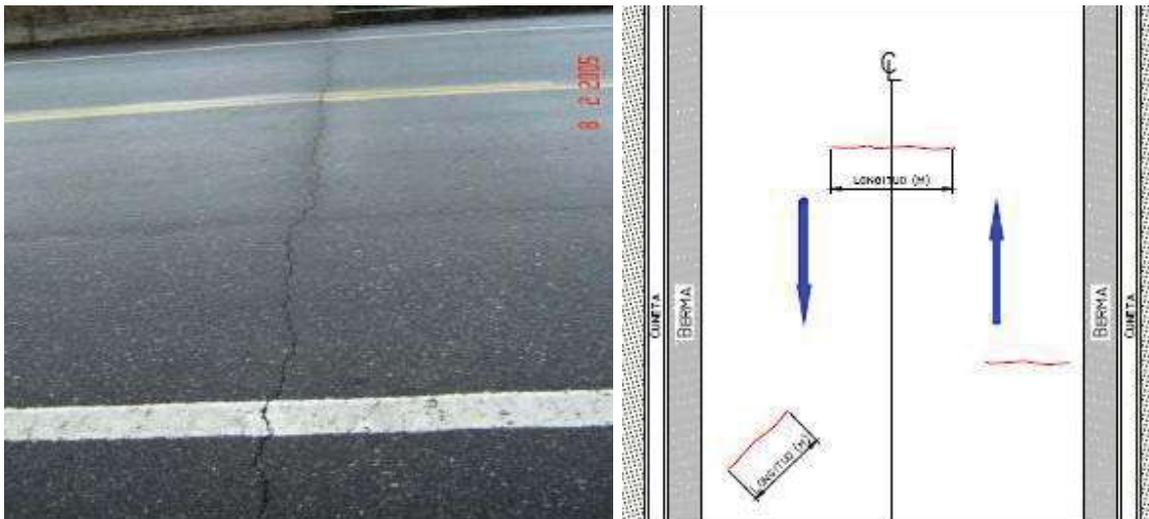


Figura 1.13 Fisuración transversal (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Fisuras en media luna.

Son fisuras de forma parabólica asociadas al movimiento del terraplén por lo que usualmente se encuentran acompañadas de hundimientos.

En el caso de presentarse un asiento importante en el terreno subyacente o un círculo de rotura que pase por la calzada, es posible que aparezcan fisuras de una gran curvatura. En este caso, se suele apreciar una diferencia de altura, generalmente ligera, entre un labio de la fisura y el otro.

En general, este tipo de fisuras se presentan por inestabilidad del terraplén o por efectos locales de desecación, aunque entre otras causas se pueden mencionar las siguientes: falla lateral del talud en zonas de terraplén, falla del talud en zonas de corte a media ladera, ausencia o falla de obras de contención de la estructura, entre otros.

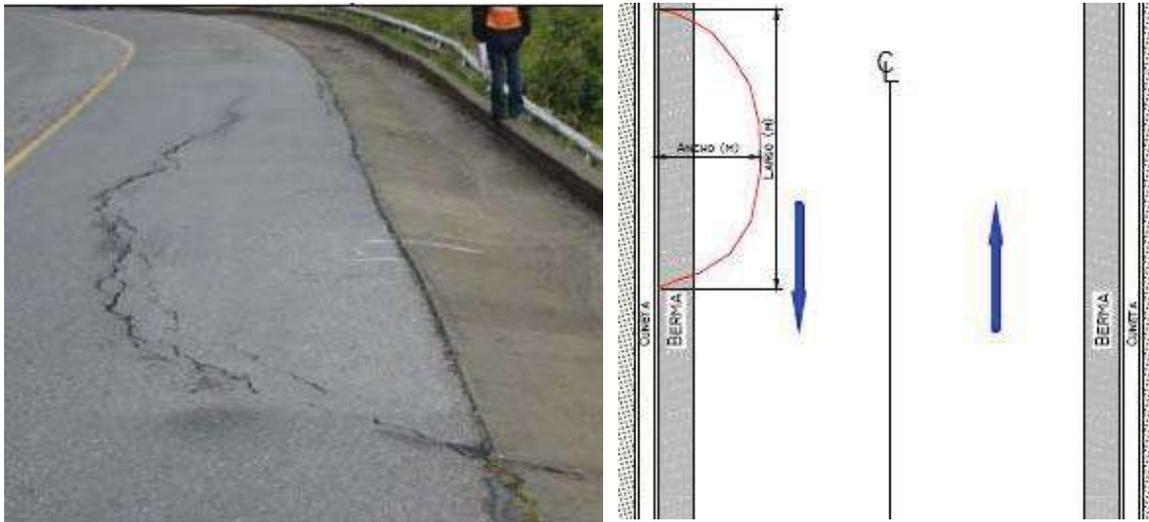


Figura 1.14 Fisuración en media luna (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

B. Deformaciones.

- Ondulaciones.

También conocida como corrugación o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas generalmente menores que 1.0 metro.

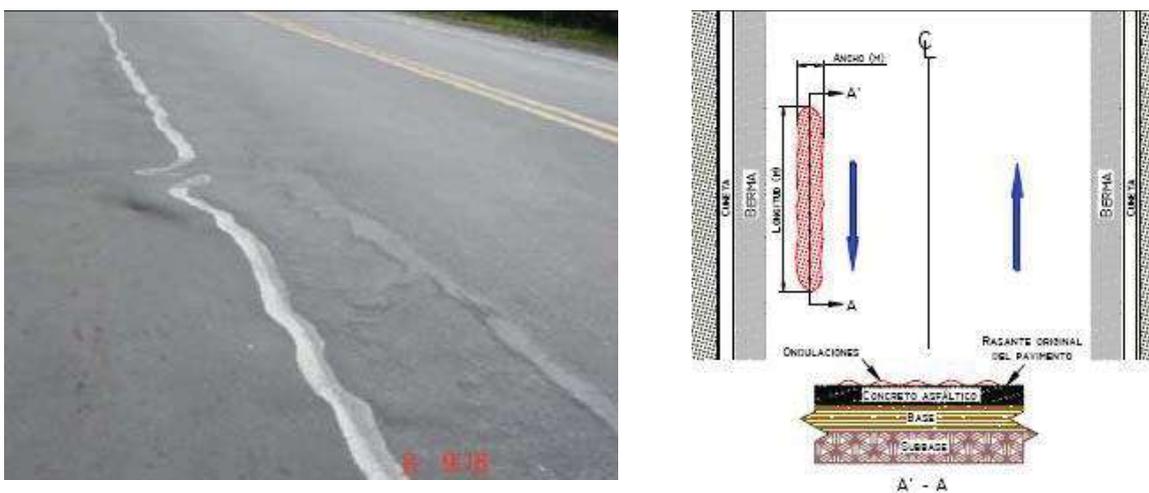


Figura 1.15 Deformaciones en forma de ondulación (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

Las ondulaciones son una deformación plástica de la capa asfáltica, debido generalmente a una pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos por una mala dosificación de asfalto, uso de ligantes blandos o agregados redondeados. Muchos de los casos suelen presentarse en los lugares de las zonas de frenado o aceleración de los vehículos.

Otra causa puede estar asociada a un exceso de humedad de la subrasante, en cuyo caso el daño afecta a toda la estructura del pavimento. Además también puede ocurrir debido a la contaminación de la mezcla asfáltica con finos o materia orgánica.

- Abultamiento.

Este deterioro se asigna a los “abombamientos” o prominencias que se presentan en la superficie del pavimento. Pueden presentarse bruscamente ocupando pequeñas áreas o gradualmente en áreas grandes, acompañados en algunos casos por fisuras.

Se genera principalmente por la expansión de la subrasante o en capas de concreto asfáltico colocado sobre placas de concreto rígido, el cual se forma al existir presiones bajo la capa asfáltica.

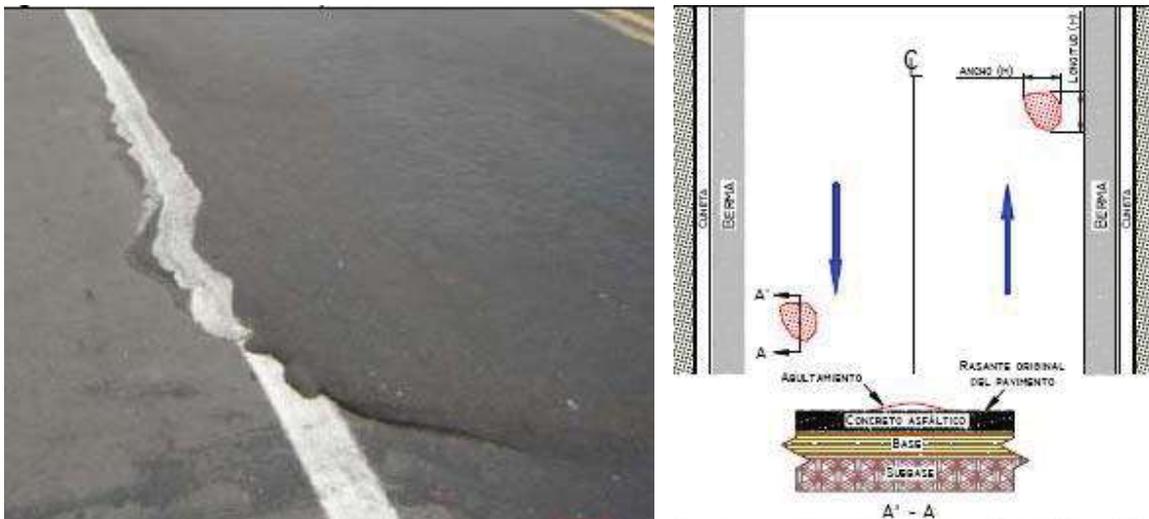


Figura 1.16 Deformaciones por abultamiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Hundimiento.

Los hundimientos corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante.

Este tipo de daño puede generar problemas de seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se puede producir hidroplaneo. Los hundimientos pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o pueden tener forma de media luna.

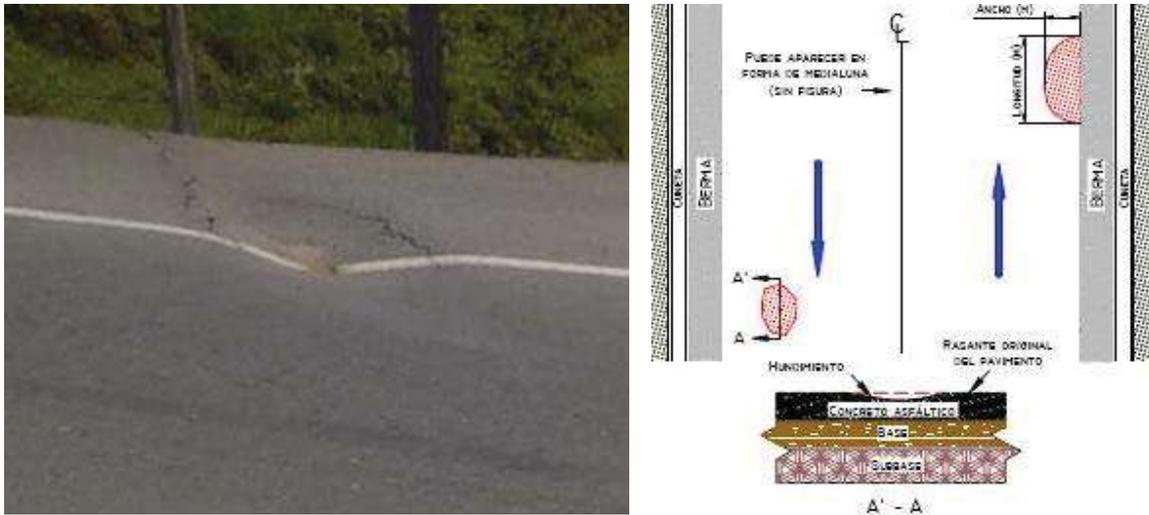


Figura 1.17 Deformaciones por hundimiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

Existen diversas causas que producen hundimientos las cuales están asociadas con problemas que en general afectan a toda la estructura del pavimento, algunas de estas son: asentamiento de la subrasante; deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en zonas de acceso a obras de arte o puentes; deficiencias de drenaje que afectan los materiales granulares; deficiencias de compactación de rellenos de zanjas que atraviesan la calzada; entre otros.

- Ahuellamiento o roderas.

El ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañada de una elevación de las zonas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración.

Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el fenómeno de hidroplaneo por almacenamiento de agua.

El ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de algunas de las capas del pavimento o de la subrasante, generada por deformación plástica de la capa asfáltica o por deformación de la subrasante debido a las constantes repeticiones de carga del tránsito.

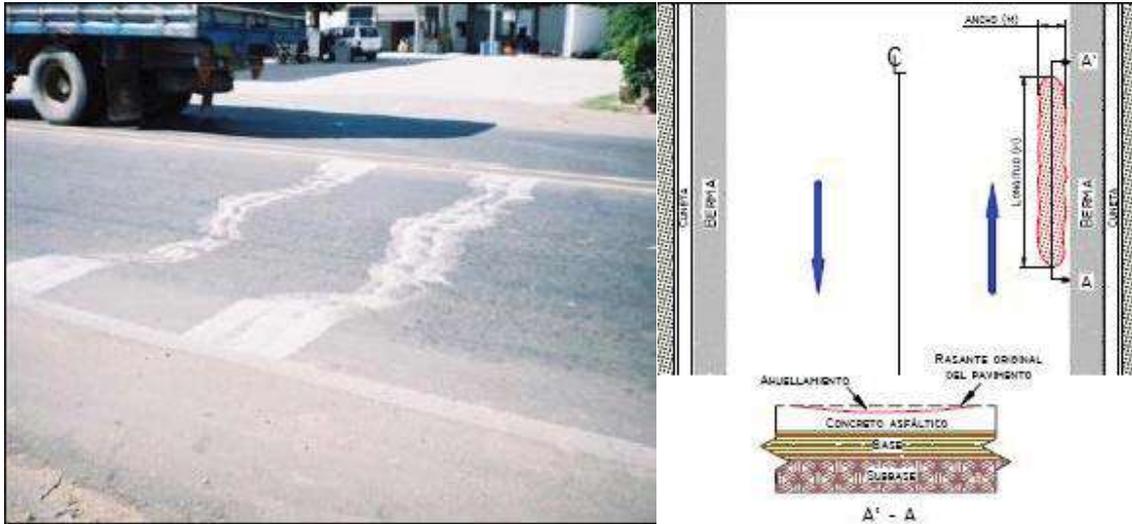


Figura 1.18 Deformaciones por ahuellamiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en climas cálidos y también puede darse por una inadecuada compactación de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o agregados redondeados.

Además, la falla estructural del pavimento puede manifestarse con daños de este tipo debido a una deficiencia de diseño, la cual se manifiesta cuando la vía está sometida a cargas de tránsito muy altas.

C. Pérdida de las capas de la estructura.

- Descascaramiento.

Este deterioro corresponde al desprendimiento de la capa asfáltica de rodadura, sin llegar a afectar las capas asfálticas superiores.

Algunas de las causas principales de este daño son: limpieza insuficiente previa a tratamientos superficiales, espesor insuficiente de las capas asfálticas de rodadura, riego de liga deficiente, mezcla asfáltica muy permeable, entre otros.

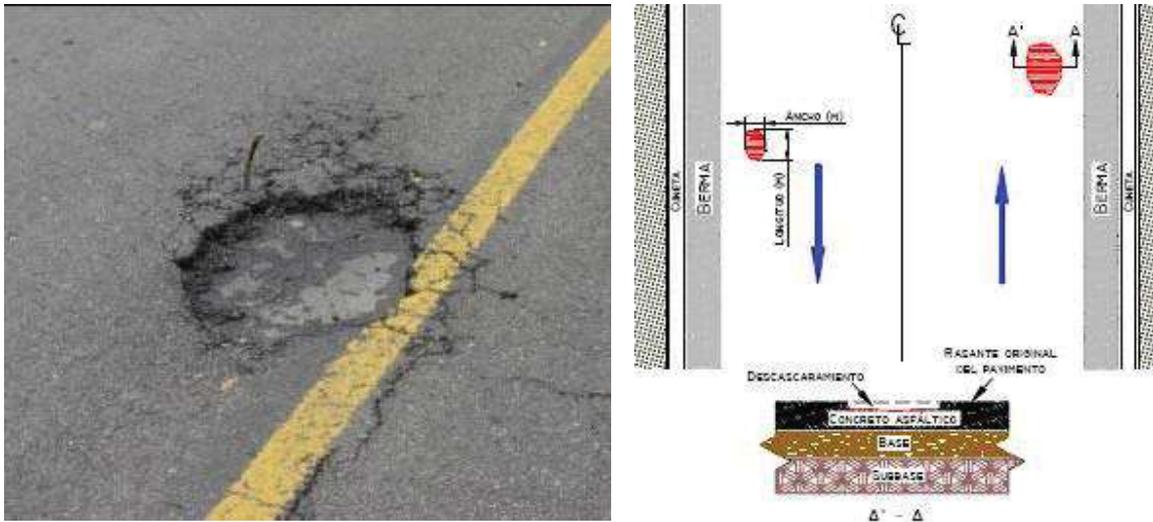


Figura 1.19 Deterioro en forma de descascaramiento (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Baches.

Los baches son una desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva al aumento del área afectada y al aumento de la profundidad debido a la acción del tránsito. Dentro de este tipo de deterioro se encuentran los conocidos como ojos de pescado, que corresponden a baches de forma redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales.

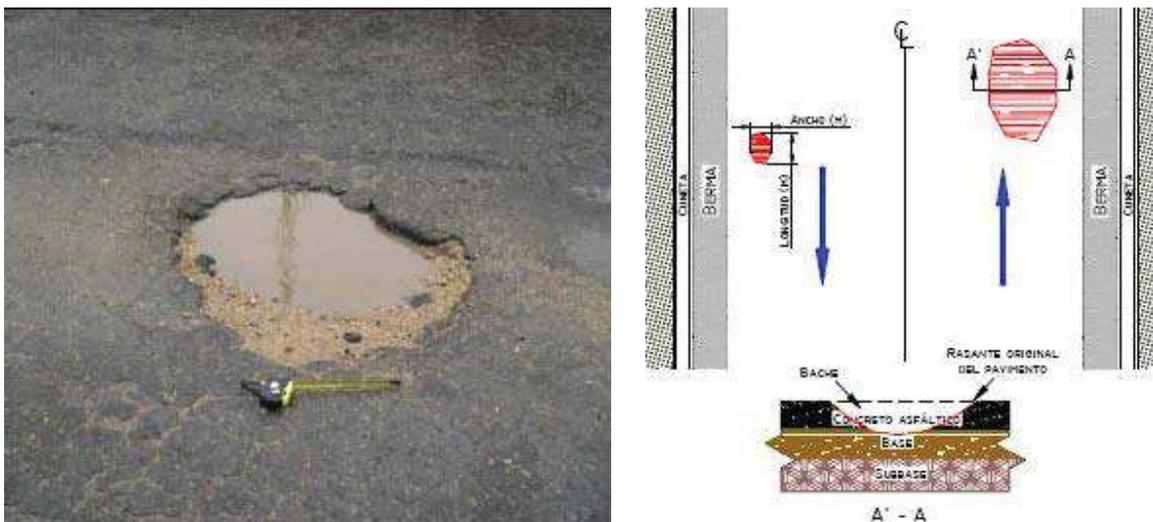


Figura 1.20 Presencia de un bache en una carretera (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

Este tipo de deterioro puede presentarse por la retención de agua en las zonas fisuradas que ante la acción del tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos generando las deformaciones y las fallas del pavimento. Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente la piel de cocodrilo.

También es consecuencia de algún defecto constructivo (por ejemplo, carencia de penetración de la imprimación de las bases granulares) o de una deficiencia de espesores de capas estructurales. Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la subrasante son débiles.

Los baches son inaceptables en una red de carreteras donde se quiere dar al usuario un nivel mínimo de funcionalidad. Además son zonas donde se debe de actuar de inmediato ya que son fuente de entrada importante de agua y de discontinuidad estructural del pavimento.

Por ultimo es importante señalar que la gravedad del bache es más función de la profundidad del mismo que de su extensión, aunque ambos parámetros importan y bastante al usuario.

D. Daños superficiales y otros daños.

- Desgaste superficial.

Corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdida de ligante y mortero. Suele encontrarse en zonas por donde circulan los vehículos; este daño provoca aceleración del deterioro del pavimento por acción del medio ambiente y del tránsito.

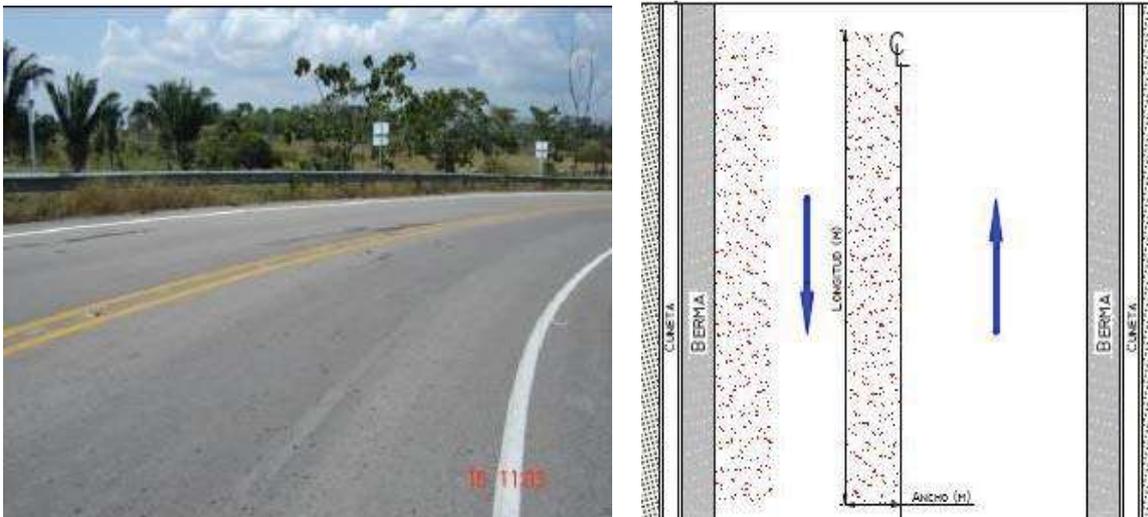


Figura 1.21 Imagen y esquema del desgaste superficial de una carretera (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

El desgaste superficial generalmente es un deterioro natural del pavimento, aunque si se presenta con severidades medias a altas a edades tempranas puede estar asociado a un envejecimiento significativo del asfalto.

Puede generarse también por las siguientes causas: falta de adherencia del asfalto con los agregados, deficiente dosificación del asfalto en la mezcla, acción intensa del agua u otros agentes abrasivos además del tránsito, entre otros.

- **Perdida del agregado.**

Conocida también como desintegración, corresponde a la disgregación superficial de la capa de rodadura debido a una pérdida gradual de agregados, haciendo la superficie más rugosa y exponiendo de forma progresiva los materiales a la acción del tránsito y los agentes climáticos. Este tipo de daño es común en tratamientos superficiales, caso en el que pueden aparecer estrías en la dirección del riego.

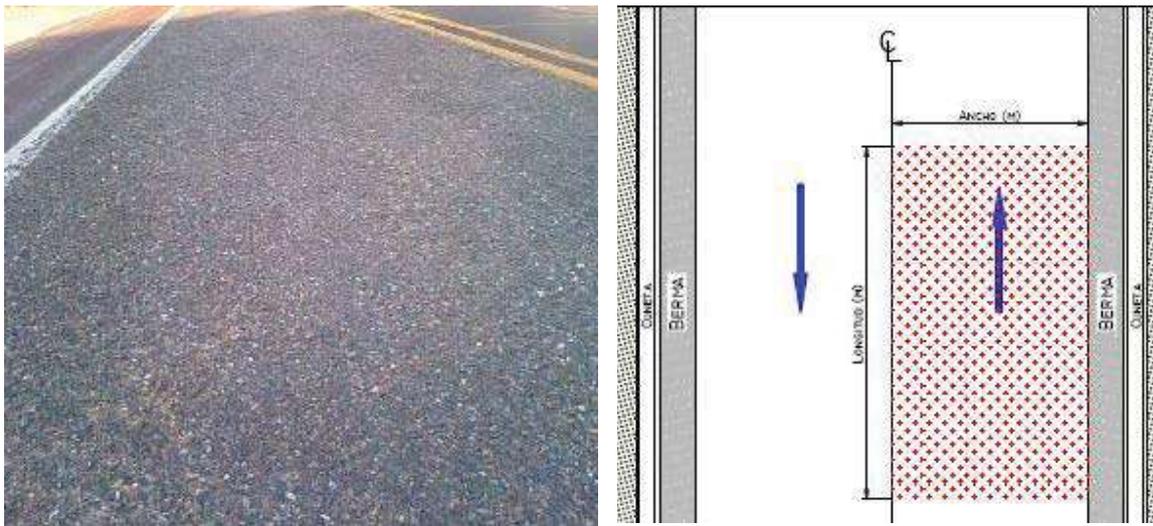


Figura 1.22 Pérdida del agregado (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

Algunas de las causas de este deterioro son: aplicación irregular del ligante en tratamientos superficiales, problemas de adherencia entre ligante y agregado, uso de agregados contaminados con finos o agregados muy absorbentes, lluvia durante la aplicación o el fraguado del ligante asfáltico, endurecimiento significativo del asfalto, contaminación de la capa de rodadura con aceite, gasolina o otros, etc.

- Pulimiento del agregado.

Este deterioro se evidencia por la presencia de agregados con caras planas en la superficie o por la ausencia de agregados angulares, en ambos casos se puede llegar a afectar la resistencia al deslizamiento.

La causa de este daño radica principalmente en una baja resistencia o susceptibilidad de algunos agregados al pulimiento (un ejemplo de estos son las calizas).

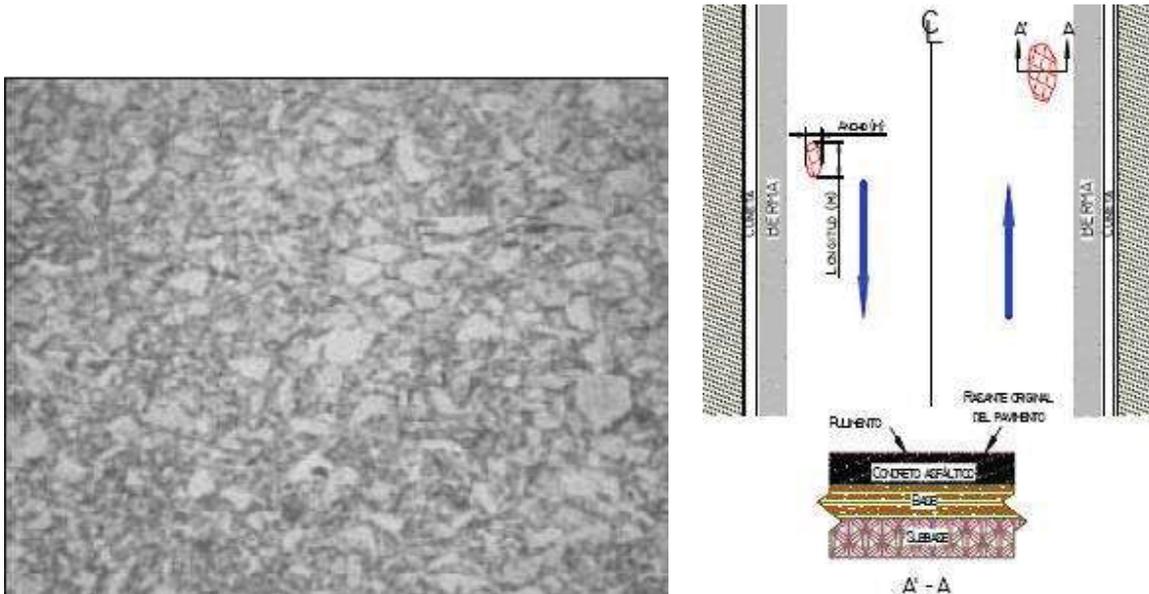


Figura 1.23 Pulimiento del agregado (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Exudación.

Este tipo de daño se presenta con una película o afloramiento del ligante asfáltico sobre la superficie del pavimento generalmente brillante, resbaladiza y usualmente pegajosa. Este es un proceso que puede llegar a afectar la resistencia al deslizamiento.

La exudación se genera cuando la mezcla tiene cantidades excesivas de asfalto haciendo que el contenido de vacíos con aire de la mezcla sea bajo; ocurre generalmente en épocas o en zonas calurosas. También puede darse por el uso de asfaltos muy blandos o por derrame de ciertos solventes.

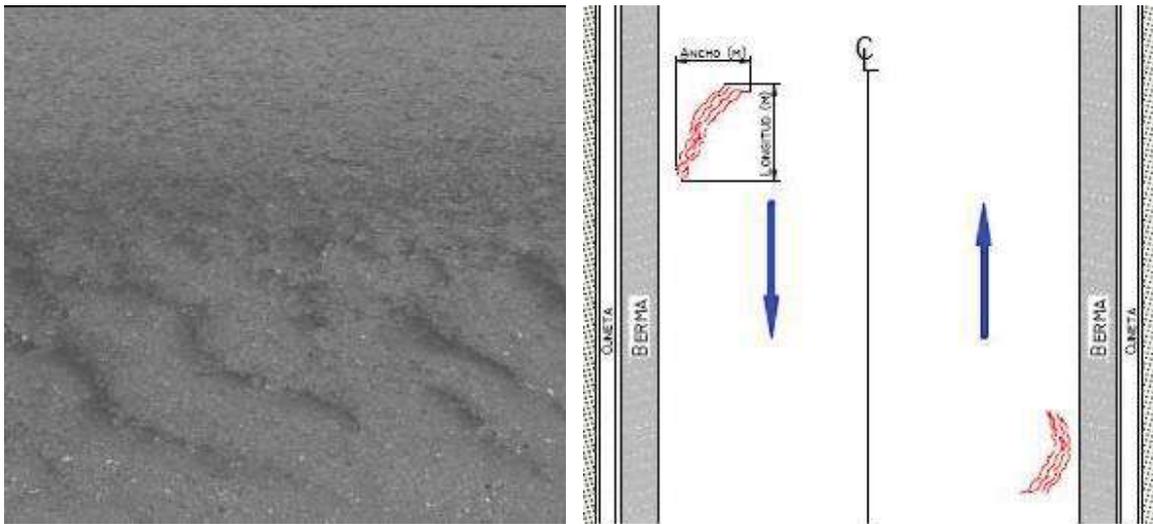


Figura 1.24 Exudación de una capa asfáltica (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

- Afloramiento de finos.

Este afloramiento corresponde a la salida de agua infiltrada, junto con materiales finos de la capa de base por las grietas, cuando circulan sobre ellas las cargas del tránsito. La presencia de manchas o de material acumulado en la superficie cercana al borde de las grietas indica la existencia del fenómeno. Se encuentra principalmente en pavimentos semi-rígidos.

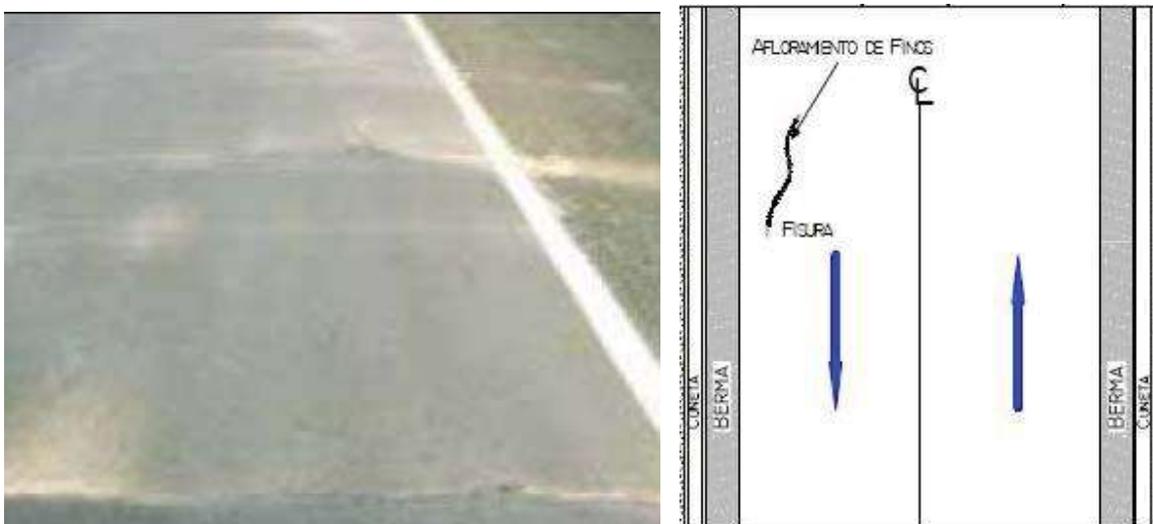


Figura 1.25 Afloramiento de finos (fuente: Ministerio de transporte de Colombia).

Algunas de las causas de este fenómeno son: ausencia o inadecuado sistema de subdrenaje, exceso de finos en la estructura, entre otros.



Capítulo 2.

Mezclas Asfálticas.

2.1.- Introducción.

Como se mencionó en el capítulo anterior los pavimentos flexibles son los de mayor importancia en la red carretera mexicana, debido a que constituyen el 90% de esta; de las diferentes capas que integran un pavimento flexible se considera que la carpeta asfáltica es la de principal interés ya que es la que está en contacto con los usuarios de las carreteras, además de ser la de mayor costo en un pavimento.

En este capítulo destinado a las mezclas asfálticas se presenta una definición del término para lograr una mayor familiarización con este, además se incluye una descripción breve de los diferentes tipos de mezclas asfálticas, con esto se pretende dar una clasificación adecuada consistente en los diferentes parámetros usados para establecer diferencias entre ellas.

Se presenta una descripción de los materiales que constituyen las mezclas asfálticas, que son el asfalto y los agregados pétreos; incluye un análisis de sus propiedades, de las diferentes pruebas y métodos para caracterizar cada uno de estos materiales. Es importante mencionar que a lo largo de este capítulo cuando se hable de mezcla asfáltica se hace referencia a las mezclas asfálticas en caliente con granulometría densa, debido a que es la empleada en la investigación.

Las características y comportamiento de las mezclas asfálticas son un factor importante para su desempeño en un pavimento, motivo por el cual se hace un análisis de estas condiciones en este capítulo; se mencionan las propiedades consideradas en el diseño de mezclas para lograr su mejor desempeño, además se hace una descripción de dos métodos de diseño, el Marshall que es el más usado en México y el SUPERPAVE, método más actual de diseño de mezclas.

En la parte final de este capítulo se mencionan las características que una mezcla asfáltica utilizada como superficie de rodamiento debe de cumplir y por último se describe el procedimiento para evaluar estas características en una carretera en servicio.

2.2.- Definición.

Las mezclas asfálticas se utilizan desde hace mucho tiempo en las capas superiores de los pavimentos flexibles. Una de las ventajas de las mezclas asfálticas es que se pueden extender en espesores muy diversos, por igual también podemos obtener diferentes grados de resistencia; lo que les permite adaptarse a una gran cantidad de condiciones estructurales.

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación y distribución uniforme de un ligante asfáltico y agregado mineral. El ligante asfáltico actúa como aglutinante formando una masa cohesiva, envolviendo cada una de las partículas del agregado mineral, debido a que este es impermeable al agua, la mezcla también se vuelve impermeable.

El agregado mineral, es un conjunto de partículas de distintos tamaños que provienen de la fragmentación natural o artificial; ligado por el asfalto, actúa como un esqueleto pétreo que aporta rigidez y resistencia a la mezcla asfáltica.

Las mezclas asfálticas pueden considerarse como un material constituido por tres fases:

- ❖ Líquida. Constituida por el asfalto que contribuye a la cohesión del material pétreo y aporta las propiedades viscosas y elásticas a la mezcla.
- ❖ Sólida. Constituida por el agregado mineral, proporciona un esqueleto para resistir las repetidas aplicaciones de carga. Dando así origen a la principal característica de la mezcla la resistencia mecánica.
- ❖ Gaseosa. Compuesta por los vacíos de aire que se encuentran en la mezcla, su presencia contribuye a que se presente una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas del tránsito, para evitar el desplazamiento de la mezcla.

Los componentes que presentan mayor influencia en una mezcla asfáltica, son el asfalto y el filler, lo que se ve reflejado en su calidad y en su costo total. Debido a las características visco-elásticas del asfalto, las mezclas asfálticas, tienen un comportamiento que depende en servicio, de la temperatura y de las velocidades de aplicación de las cargas.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que también su uso se presenta en las capas inferiores de los pavimentos para tránsitos pesados intensos.

2.3.- Tipos de Mezclas Asfálticas.

Existen diversos parámetros para establecer una clasificación que determine las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones que podemos adoptar pueden ser múltiples, en el presente trabajo se adoptó la siguiente:

- ❖ Por las fracciones de agregado pétreo utilizado.
 - Masilla asfáltica: esta compuesta de polvo mineral (filler) más ligante.
 - Mortero asfáltico: consiste de un agregado fino más una masilla, se utiliza como superficie de rodamiento colocándose sobre una base impregnada o sobre una carpeta asfáltica.
 - Concreto asfáltico: es una mezcla asfáltica en caliente, muy bien controlada, de cemento asfáltico (de alta calidad) y agregado grueso bien graduado (también de alta calidad), compactada muy bien para formar una masa densa y uniforme.
 - Macadam asfáltico: agregado grueso más ligante asfáltico.
- ❖ Por la temperatura de puesta en obra.
 - Mezcla asfáltica en caliente: mezclas de planta que deben ser colocadas y compactadas a temperaturas elevadas. Para secar el agregado y obtener suficiente fluidez del asfalto (usualmente cemento asfáltico), ambos deben calentarse antes de ser mezclados, dando origen a la expresión "mezcla en caliente".
 - Mezcla asfáltica en frío: una mezcla de asfalto emulsionado y agregado; producida en una planta central (mezcla en planta) o mezclada en el lugar de la obra (mezcla in situ), se colocan y compactan generalmente a temperatura ambiente.
- ❖ Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.
 - Mezclas densas: son mezclas donde el porcentaje de vacíos es menor o igual al 6 %.
 - Mezclas semi-densas: cuentan con una proporción de vacíos de 6 % a 10 %.
 - Mezclas abiertas: tienen una proporción de vacíos superior al 12 %.
 - Mezclas drenantes: presentan un porcentaje de vacíos superior al 20 %.
- ❖ Por el tamaño máximo del agregado pétreo.
 - Mezclas gruesas: en este tipo de mezclas se utilizan materiales pétreos con tamaño máximo de 1 ½ ".
 - Mezclas finas: conocidas también como microaglomerados, están formadas por agregados finos, polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado es

factor para determinar el espesor mínimo con el que ha de extenderse la mezcla, que debe de ser del orden del doble o triple este.

- ❖ Por la estructura del material pétreo.
 - Mezclas con esqueleto mineral: poseen una estructura mineral resistente, esta se debe en gran medida al rozamiento interno de los agregados, aunque también la masilla influye notablemente en la resistencia de la mezcla.
 - Mezcla sin esqueleto mineral: no poseen una estructura mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.
- ❖ Por la granulometría.
 - Mezclas continuas: contienen una buena distribución de los diferentes tamaños de agregados pétreos, dando lugar a una buena granulometría.
 - Mezclas discontinuas: los tamaños de material pétreo se centran tan solo en unos rangos específicos, presentándose una discontinuidad granulométrica, dándose así lugar a su nombre.

2.4.- Materiales Utilizados.

2.4.1.- Asfalto.

Es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de una mezcla en caliente.

El asfalto usado en pavimentación generalmente conocido como cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y, por lo tanto, es un excelente ligante para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos agentes químicos.

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas del agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que la mezcla terminada sea construida de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

Para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo del petróleo o mezclas de crudo de petróleo; el asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de

destilación por vacío o extracción con solventes. Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia.

A.- Clasificación, propiedades químicas y físicas del asfalto.

- *Clasificación.* Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

- Cemento asfáltico.
- Asfalto rebajado.
- Asfalto emulsificado.

Los asfaltos rebajados y emulsificados son usados casi por completo, en mezclas en frío y en riegos, y no se discutirá más de ellos en este trabajo.

Los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes. Ellos son: viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración.

En el sistema de viscosidad, el poise es la unidad normal de medida para viscosidad absoluta; en cuanto más alto es el número de poises, más viscoso es el asfalto. Cuando se clasifica el asfalto por medio de su viscosidad después del envejecimiento; la idea es identificar cuáles serán sus características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en la carpeta asfáltica, para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado, el asfalto debe ser ensayado en laboratorio utilizando el ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento se clasifica, de acuerdo a su viscosidad; una vez más la unidad de medida es el poise. El tercer método usado para clasificar el asfalto es el de la penetración que consiste en dejar penetrar una muestra de asfalto por una aguja bajo una carga dada. La distancia que la aguja penetra en la muestra en un tiempo determinado es medida en decímetros de milímetro (0.1 mm).

- *Propiedades químicas del asfalto.* El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen un material muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfalto y los diseñadores de pavimentos han aprendido a identificar y caracterizar estas propiedades y a usarlas, dentro de la estructura del pavimento de la forma más ventajosa posible.

Básicamente el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es diluido en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos.

Los asfáltenos no se disuelven en el heptano; una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso del grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Los máltenos se disuelven en heptano; son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color mas claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y resinas. La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar debido a un sinnúmero de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado. Las reacciones y tipos de cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o mas moléculas para formar una molécula mas pesada) y otros cambios que pueden afectar significativamente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfáltenos, durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

- **Propiedades físicas del asfalto.** Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

Durabilidad: es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por eso es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto; estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

Adhesión y Cohesión: Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en la carpeta asfáltica.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; mas bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como relacionada con estas propiedades del asfalto. En consecuencia el ensayo es del tipo "califica - no califica" y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir los requisitos mínimos.

Susceptibilidad a la temperatura: Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven mas duros (mas viscosos) a medida de que su temperatura disminuye y mas blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es importante conocer esta característica del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe de mezclar el asfalto con el agregado y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Endurecimiento y envejecimiento: los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es principalmente causado por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre mas fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como las películas que cubren las partículas de agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado; esto hace que la oxidación y el envejecimiento mas severo ocurra en esta etapa de mezclado. No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas del agregado.

B.- Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico.

- **Viscosidad:** La viscosidad a 60°C es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135°C corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado.

La prueba de viscosidad a 60°C utiliza un viscosímetro de tubo capilar, el cual consiste en un tubo calibrado de vidrio que mide el flujo del asfalto. El viscosímetro es colocado en un baño de agua con temperatura controlada y es pre-calentado a 60°C. Luego se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro, una muestra de cemento asfáltico calentada a la misma temperatura.

A una temperatura de 60°C, es necesario aplicar un vacío parcial al extremo pequeño del tubo para pasar el asfalto a través del mismo, debido a que el cemento asfáltico es muy viscoso y no puede fluir fácilmente a través de la estrecha abertura del tubo capilar. El tiempo que el asfalto tarda para pasar de una marca a otra del tubo es registrado, a medida que este comienza a fluir. Este tiempo es convertido fácilmente a poises, siendo la unidad normal de medida para la viscosidad del asfalto.

El ensayo de viscosidad a 135°C es similar al ensayo descrito anteriormente, sin embargo, debe de haber ciertas variaciones debido a que la temperatura es más alta. En primer lugar, es necesario usar un aceite claro en el baño con temperatura controlada debido a que el agua se evaporaría a 135°C. En segundo lugar, se utiliza un viscosímetro que no requiera de la aplicación de vacío debido a que el cemento asfáltico posee suficiente fluidez a 135°C. Por último, la medida de la viscosidad utilizada es convertida a centistokes en vez de poises, debido a que el flujo inducido a través del tubo es inducido por gravedad y no por vacío.

- **Penetración:** el ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean usados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C.

La prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25°C en un baño de agua con temperatura controlada. Seguidamente, una aguja de dimensiones prescritas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos. La distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 milímetros. La cantidad de estas unidades es llamada la "penetración" de la muestra.

- **Punto de inflamación:** El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra y crean un destello en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un cemento asfáltico se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. El procedimiento básico para determinarlo consiste en calentar, gradualmente, una muestra de cemento asfáltico en una copa de latón mientras se está aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra. La temperatura a la cual se presentan destellos instantáneos de vapores sobre la superficie se denomina punto de inflamación. El ensayo de copa abierta de Cleveland es el procedimiento más comúnmente usado para determinar el punto de inflamación.

- **Prueba de película delgada en horno (TFO) y Prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO):** estos ensayos no son verdaderas pruebas, solamente son procedimientos que exponen una muestra de asfalto a unas condiciones que aproximan las ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración, efectuadas sobre las obtenidas después de los ensayos de TFO y RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado, del material, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

El procedimiento de TFO consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico en un platillo de fondo plano tal que la muestra cubra el fondo del platillo con un espesor aproximado de 3 mm. La muestra y el platillo se colocan, luego, en un plato rotatorio dentro de un horno y se mantiene una temperatura de 163°C por cinco horas. En seguida se ensaya la muestra en vejecida y endurecida artificialmente, para determinar su viscosidad y/o penetración.

El equipo requerido por la prueba de RTFO requiere de un horno especial y unas botellas especialmente diseñadas para contener las muestras del ensayo. La muestra de cemento asfáltico se coloca en la botella y luego se pone, de costado, en un soporte rotatorio, el cual hace girar continuamente la botella dentro del horno (manteniendo a 163°C). La rotación de la botella expone continuamente al cemento asfáltico en forma de películas delgadas. La abertura de la botella pasa, durante cada rotación completa, por un chorro de aire que remueve de la botella cualquier acumulación de vapores.

Las ventajas del ensayo RTFO sobre el ensayo TFO consiste en que el horno del RTFO permite acomodar un mayor número de muestras y que el tiempo requerido para endurecer las muestras es menor.

- **Ductilidad:** es la medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de extensión, en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y una temperatura específica. El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. La longitud del hilo de material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra.

- **Solubilidad:** es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partícula. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

2.4.2.- Asfaltos Modificados.

Algunos cementos asfálticos requieren la modificación para mejorar sus características o cumplir con las especificaciones. La modificación del cemento asfáltico se ha practicado por más de 50 años pero ha recibido la atención en la última década. Hay una numerosa cantidad de aditivos disponibles en el mercado hoy en día. Las ventajas del asfalto modificado se pueden observar solamente por una selección cuidadosa del tipo de modificantes; ya que no todos los modificantes son apropiados para todos los usos.

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 asfalto se debe modificar generalmente para lograr:

- Bajar la viscosidad a temperaturas altas asociadas a la construcción. Esto facilita el bombeo del asfalto líquido así como el mezclado y la compactación de la mezcla.
- Una dureza más alta en altas temperaturas del servicio. Esto reducirá el fracturamiento y la deformación.
- Bajar la dureza y características más rápidas de la relajación en las temperaturas bajas del servicio. Esto reducirá los agrietamientos.
- Incremento en la Adherencia del asfalto y el agregado en presencia de la humedad. Reduce la probabilidad de peladuras.

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 son:

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) figura 2.1 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. El poliestireno es un plástico duro, resistente y le da al SBS su durabilidad. El polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características similares al caucho.

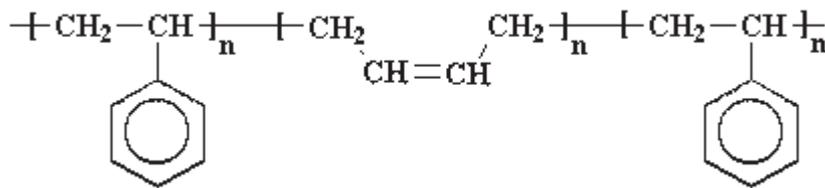


Figura 2.1 Estireno-Butadieno-Estireno, conocido como caucho SBS (fuente: www.pslc/sbs.htm).

Dicho copolímero está constituido por una corta cadena de poliestireno, seguida por otra larga cadena de polibutadieno y finalmente por otra corta cadena de poliestireno. Si pudiéramos extender una cadena de SBS, se vería como en la figura 2.2.



Figura 2.2 Cadena de SBS (fuente: www.pslc/sbs.htm).

Resulta sumamente difícil mezclar dos polímeros diferentes, aún cuando sean muy similares. Esto es aplicable tanto a los bloques de nuestro SBS como a otros polímeros. Por lo tanto los bloques de poliestireno tienden a agruparse entre sí, al igual que los bloques de polibutadieno. Los distintos clusters de poliestireno se mantendrán unidos entre sí por los bloques de polibutadieno (Figura 2.3). Los clusters de poliestireno actúan como reticulantes para los bloques de polibutadieno. Las agrupaciones de poliestireno se romperán cuando el SBS es calentado, de modo de poder ser procesado y reciclado como un polímero no entrecruzado.

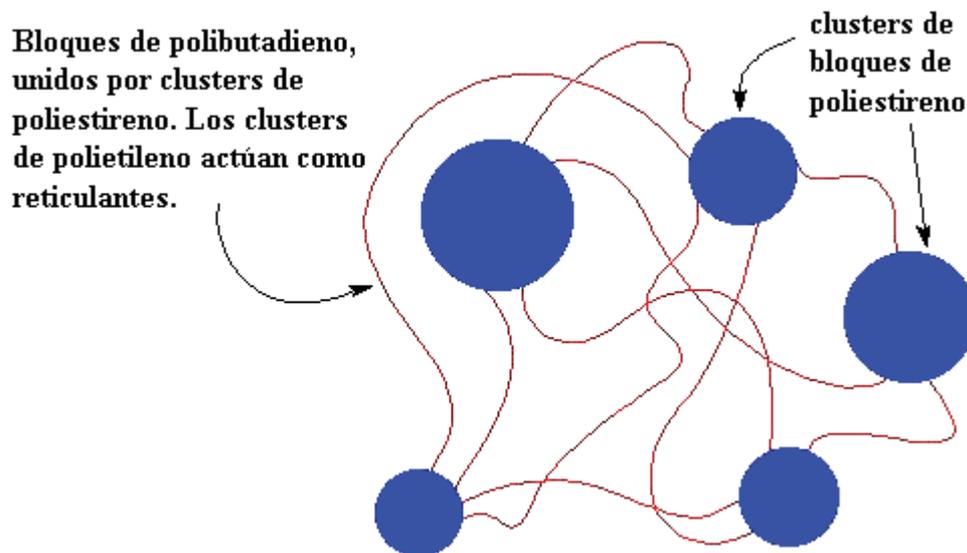


Figura 2.3 Forma de unión del polímero (fuente: www.mauritonda@yahoo.com.ar).

- 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.

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.

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

- Mayor intervalo de plasticidad (diferencia entre el punto de ablandamiento)
- 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 compatibles 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.

2.4.3.- Agregado.

Es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de una mezcla asfáltica se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

A.- Clasificación de agregados.

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas; esta clasificación se basa en el tipo de formación de cada roca.

- *Rocas Sedimentarias*: se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua, o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos, de residuos de productos animales, de los productos finales de una acción química o una evaporación, o de la combinación de cualquiera de estos materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceo y calcáreo. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un porcentaje alto de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas. Las rocas sedimentarias se encuentran, característicamente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas.

- *Rocas Ígneas*: las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido fuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabbro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en canteras y posteriormente usadas.

- **Rocas Metamórficas:** son generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en planos o capas paralelas. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formada de arcilla esquistosa; una roca sedimentaria). No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de calizas) y la cuarcita (formada de areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliaciones.

B.- Fuentes de agregados.

Los agregados usados en un pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales.

- **Agregados naturales:** son aquellos usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares, por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 4.75 mm (No. 4). La arena se define como partículas de un tamaño menor de 4.75 mm (No. 4) pero mayor que 0.075 mm (No. 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (No. 200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y arenas son clasificadas además de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra adentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.

- *Agregados procesados*: son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas mas apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaños antes de ser usados en pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las rocas a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios de textura superficial y en la forma de las partículas son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de la partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de obra. El agregado triturado, sin tamizar es conocido como agregado sin cribar y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos.

- *Agregados sintéticos*: este tipo de agregado no existe en la naturaleza; son el producto del procesamiento físico o químico de los materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario mas comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota de la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al templarla inmediatamente en agua, o al triturarla una vez que se ha enfriado.

C.- Propiedades del agregado.

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica en caliente, el agregado conforma el 90 al 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aun más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer además ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

- Graduación y tamaño máximo de la partícula.
- Limpieza.
- Dureza.
- Forma de la partícula.
- Textura de la superficie.
- Capacidad de absorción.
- Afinidad con el asfalto.
- Gravedad específica.

- Graduación y tamaño máximo de la partícula.

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender como se mide el tamaño de las partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

Tamaño máximo de la partícula: el tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

- Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

Granulometría del agregado: es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis de tamices consiste en pasar la muestra

por una serie de tamices, cada una de las cuales tiene tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de su abertura. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

La granulometría del agregado, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Las mezclas asfálticas son clasificadas de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen. Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

- Agregado grueso – material retenido por el tamiz 4.75 mm (No. 4).
- Agregado fino – material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).
- Filler – fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075 mm (No. 200).

- Cálculos relacionados con el agregado

Análisis de Granulometría: las granulometrías se expresan ya sea en porcentaje total que pasa (el porcentaje total, en peso, de muestra de agregado que es pasa a través de un tamiz dado), porcentaje total retenido (el porcentaje total en peso, de muestra de agregado que es retenido en un tamiz dado), o porcentaje total que pasa y retenido (el porcentaje total, en peso, de muestra de agregado que pasa a través de un tamiz dado y que es retenido en el tamiz que sigue hacia abajo). La granulometría del agregado, después de ser calculada, se dibuja como una curva continua. Dos tipos de curvas que generalmente se usan son: curvas de gráficos semi-logarítmicos y curvas de gráficos exponenciales.

El porcentaje que pasa cada tamiz es dibujado como un punto sobre la línea vertical correspondiente. Después de que se han dibujado todos los puntos para cada tamiz con su respectivo porcentaje, estos son unidos por medio de una línea continua. Esta línea representa la curva de granulometría del agregado en cuestión. Uno puede saber inmediatamente si la granulometría del agregado cumple con las especificaciones de graduación, si se dibuja la banda de especificaciones.

Cálculos de Proporcionamiento: el análisis de granulometría de agregado y la combinación de agregado para obtener la granulometría deseada, son pasos importantes en el diseño de la mezcla; los agregados deberán de satisfacer las especificaciones impuestas por el método de diseño, además deberán ser los más adecuados y económicos que puedan ser encontrados.

Para poder obtener la granulometría de referencia es necesario determinar proporciones exactas de cada agregado cuando estos se están combinando. Para calcular estas proporciones se han desarrollado procedimientos matemáticos.

Cálculos de Gravedad Específica: es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. La gravedad específica es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo a su peso.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el la gravedad específica de los agregados usados es que este ayuda al calculo del porcentaje de vacios de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben de incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacios o espacios de aire. La única manera de calcular el porcentaje de vacios de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación es midiendo el peso especifico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego restando, de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conforman la mezcla. El resultado es una indicación del volumen de vacios de aire de la muestra.

Se han desarrollado tres tipos de gravedad específica para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiera para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacios de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Gravedad específica total.
- Gravedad específica efectiva.
- Gravedad específica aparente.

La gravedad específica total de una muestra incluye todos poros de la muestra.

La gravedad específica aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra.

La gravedad específica efectiva excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto.

La gravedad específica total asume que los poros que absorben agua no absorben asfalto. La gravedad específica aparente asume que todos los poros que son permeables al agua absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera. Por lo tanto, la gravedad específica efectiva, la cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es la que mas se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de las mezclas asfálticas.

- Limpieza.

Las especificaciones de obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla, partículas blandas, terrones de arcilla, etc) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento de las mezclas asfálticas.

La limpieza del agregado puede determinarse generalmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable mas fino que 0.075 mm (No. 200). El ensayo de equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino de arcilla y arcilla en la fracción de agregado que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

- Dureza.

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de las mezclas de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben ser mas duros (tener mas resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Desgaste de los Ángeles mide la resistencia de un agregado al desgaste y la abrasión.

- Forma de la Partícula.

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten al desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre por trituración.

Muchas de las mezclas asfálticas contienen partículas angulares y redondas; las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en la mezcla y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

- Textura Superficial.

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Una textura áspera como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas

respecto de otras, y a la vez posee un coeficiente alto de fricción que hace que el movimiento del tránsito sea mas seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

- Capacidad de Absorción.

Todos los agregados son porosos y algunos más que otros, la cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información; si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en la superficie para ligar las demás partículas del agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las requeridas por un agregado menos poroso.

- Afinidad con el Asfalto.

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas trapeneas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos por separar el asfalto de su superficie.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silicios (cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento.

No es muy claro el porque los agregados hidrofílicos e hidrofobicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar, es sumergida en agua y las partículas cubiertas son observadas visualmente. En otro ensayo, comúnmente conocido como de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada como un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

2.5.- Características y Comportamiento de la Mezcla.

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis esta enfocado hacia cuatro características de la mezcla y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

2.5.1.- Densidad.

La densidad de la mezcla compactada esta definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas de análisis y diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kg/m^3 . La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua. La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen utilizando los métodos normalizados de compactación en laboratorio.

2.5.2.- Vacíos de Aire.

Son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas la mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para poder permitir alguna compactación adicional bajo el tránsito y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

La durabilidad de una mezcla asfáltica es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea el contenido de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación del asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

2.5.3.- Vacíos en el Agregado Mineral.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado de una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño de agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad de la mezcla, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto.

2.5.3.-Contenido de Asfalto.

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe de ser determinada con exactitud en el laboratorio y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto depende de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto; entre más finos contiene la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerido para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo es más pronunciada cuando hay presencia de relleno mineral (filler); los pequeños incrementos en la cantidad de filler, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca; por el contrario los pequeños contenidos de filler resultan en una mezcla muy rica (húmeda).

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto; esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionado a la mezcla para producir las cualidades necesarias a la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es el contenido de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se

obtiene al restar la cantidad la cantidad de asfalto absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

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

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

2.6.- Diseño de Mezclas.

Las buenas mezclas asfálticas trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de los pavimentos de flexibles; estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. El objetivo primordial del procedimiento de diseño de las mezclas es el de garantizar que la mezcla posea cada una de estas propiedades.

2.6.1.- Estabilidad.

La estabilidad de una mezcla es su capacidad para resistir al desplazamiento y deformación bajo los efectos del tránsito; una mezcla estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo las cargas repetidas, una mezcla inestable desarrolla ahullamientos, ondulaciones y otras señas que indican cambios en las mezclas.

Los requisitos de estabilidad solo se pueden establecer después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad dependen del tránsito esperado. Dichas especificaciones deben de ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no mas altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen una mezcla muy rígida y por lo tanto menos durable de lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende la fricción y de la cohesión interna; la fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre las partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto de otras debido a las fuerzas ejercidas por el tránsito. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente de la mezcla, la tabla 2.1 enuncia varias de estas causas y efectos.

Tabla. 2.1 Causas y efectos de inestabilidad en la mezcla (Asphalt Institute, 1982).

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahullamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia bajo la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

2.6.2.- Resistencia a la fatiga.

La resistencia a la fatiga de una mezcla es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en una mezcla aumenta, ya sea por el diseño o por la falta de compactación, la resistencia a la fatiga disminuye. Así mismo, una mezcla que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, además de la capacidad portante de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con las cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles. La tabla 2.2 presenta una lista de las causas y efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga.

Tabla. 2.2 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga (Asphalt Institute, 1982).

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado del pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

2.6.3.- Durabilidad.

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

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. Una graduación densa de agregado duro, firme y resistente a la separación, contribuye de tres maneras, a la durabilidad de la mezcla; una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla; un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo la acción de las cargas del tránsito; un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar las películas de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración de la mezcla. La tabla 2.3 presenta una lista de causas y efectos asociados a la durabilidad.

Tabla. 2.3 Causas y efectos de una poca durabilidad (Asphalt Institute, 1982).

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (hidrofilicos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado.

2.6.3.- Impermeabilidad.

La impermeabilidad de una mezcla asfáltica es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada; aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de una mezcla asfáltica, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad esta determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie de la mezcla.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad este dentro de los límites especificados. La tabla 2.4 cita ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de impermeabilidad para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Tabla. 2.4 Causas y efectos de la permeabilidad (Asphalt Institute, 1982).

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

2.6.5.- Trabajabilidad.

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad. Un contenido demasiado alto de filler también puede afectar la trabajabilidad, debido a que puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas; este tipo de mezclas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente, generalmente son el producto de una falta de filler, demasiada arena de tamaño medio, partículas lisas y redondeadas de agregado y/o demasiada humedad en la mezcla.

El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. La tabla 2.5 cita algunas causas y efectos relacionados con la trabajabilidad de las mezclas asfálticas.

Tabla. 2.5 Causas y efectos de problemas de trabajabilidad (Asphalt Institute, 1982).

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

2.6.6.- Resistencia al deslizamiento.

Es la habilidad de una mezcla asfáltica de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de un vehículo, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe de ser capaz mantener contacto con la superficie de rodamiento en vez de rodar sobre una superficie de agua (hidroplaneo). Una superficie áspera y rugosa del pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa; esto se logra empleando agregados de textura áspera, en una mezcla de graduación abierta, además los agregados deben de resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. La tabla 2.6 presenta una lista de las causas y efectos relacionados con una mala resistencia al deslizamiento.

Tabla. 2.6 Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento (Asphalt Institute, 1982).

Causas	Efectos
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla.	Poca resistencia al hidroplaneo.

2.6.7.- Flexibilidad.

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

2.7.- Métodos de Diseño.

El diseño de mezclas asfálticas consiste en seleccionar y proporcionar materiales para obtener las propiedades deseadas de la mezcla terminada. El objetivo general del procedimiento de diseño consiste en determinar una combinación y graduación económica de agregados (dentro de los límites de especificaciones del proyecto) y asfalto que produzca una mezcla con:

- Suficiente asfalto para garantizar una mezcla durable.
- Adecuada estabilidad para que satisfaga las demandas de tránsito sin producir deformación o desplazamiento.
- Un contenido de vacíos suficientemente alto para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas del tránsito sin que produzca exudación o pérdida de estabilidad.
- Suficiente trabajabilidad para permitir una colocación eficiente sin segregación.

El proceso de diseño de una mezcla asfáltica consiste en la selección del agregado, selección del asfalto, compactación de los especímenes de prueba, el cálculo de los parámetros volumétricos y la determinación del contenido óptimo de asfalto.

El diseño de mezcla seleccionado es, usualmente, el más económico y el que cumple satisfactoriamente con todos los requisitos establecidos. El diseño de mezclas es una herramienta usada en el control. Es utilizada en la aceptación de materiales, en el control de la mezcla de obra y en la compactación final de la mezcla.

A continuación se presentan dos métodos de diseño de mezclas: el Marshall que es el más utilizado en México y el SUPERPAVE que es el más actual para el diseño de mezclas asfálticas.

2.7.1.- Método Marshall.

El concepto del método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-Ingeniero de asfaltos del departamento de carreteras del estado de Mississippi. El cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensa investigación y

estudios de correlación, mejoraron y adicionaron ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrollaron un criterio de diseño de mezclas.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método original únicamente es aplicable para mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contenga agregado con tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos de 38 mm (1 ½"). Este puede ser usado para diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

El método Marshall usa especímenes de prueba normalizados de 64 mm (2 ½") de espesor por 101.6 mm (4") de diámetro. Se utiliza un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar una serie de probetas, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto. Los datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad y una prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

- Procedimiento del ensayo Marshall.

El método de ensayo Marshall consta de tres procedimientos. Estos son: determinación de la gravedad específica, medición de la estabilidad y flujo, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

- Determinación de la gravedad específica.

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado a la temperatura ambiente. La medición de gravedad específica es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D2726.

- Ensayos de estabilidad y flujo.

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. El flujo la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60°C (140°F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura mas caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es extraída del baño, secada y colocada en el aparato Marshall, este aparato consiste de un dispositivo que aplica carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación.
3. La carga aplicada a las probetas tiene una velocidad constante de 50.8 mm (2") por minuto hasta que la muestra falle. La falla es definida como la carga máxima que la probeta puede resistir.
4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de deformación se registra como el flujo.

- Valor de estabilidad Marshall.

El valor de estabilidad es una medida de la carga bajo la cual cede o falla totalmente. Durante el ensayo, la carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall. Debido a que esta indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor mucho mas alto será mejor. Para muchos materiales utilizados en ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, en el caso de las mezclas asfálticas en caliente, las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

- Valor de flujo Marshall.

El flujo representa la deformación de la probeta; la deformación esta indicada por la disminución en el diámetro vertical de la muestra. Las mezclas que tienen valores bajos de flujo y valores muy altos de estabilidad son consideradas como demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de flujo son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

- Análisis de densidad y vacíos.

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y flujo, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del

agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Los vacíos (Va) son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Los vacíos en el agregado mineral (VAM), están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentran entre las partículas de agregado de la mezcla compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como porcentaje del volumen total de la mezcla. Los vacíos llenos de asfalto (VFA), son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto, el VFA abarca asfalto y aire.

2.7.2.- Método SUPERPAVE.

En 1987, el SHRP (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final del programa de investigación sobre asfaltos de SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Fundamentalmente, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes de una mezcla asfáltica, diseño y análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

- *Ligantes asfálticos.*

Una parte del SUPERPAVE es una nueva especificación sobre ligantes asfálticos con un nuevo conjunto de ensayos. El documento se denomina especificación para ligantes ya que es aplicado tanto para asfaltos convencionales como modificados.

La singularidad de este nuevo sistema consiste en que es una especificación basada en el desempeño (performance). Especifica ligantes en base al clima y a la temperatura prevista en el pavimento. El grado de desempeño (PG) de un ligante es PG XX-YY. El primer valor XX, es normalmente llamado "grado de alta temperatura"; lo que significa que el ligante posee propiedades físicas adecuadas al menos hasta esa temperatura. El segundo valor YY es llamado "grado de baja temperatura"; y significa que el ligante posee propiedades físicas adecuadas hasta al menos esa temperatura.

Otro aspecto clave en la evaluación de ligantes con este sistema es que las propiedades físicas son medidas sobre ligantes que han sido envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones de envejecimiento en un pavimento real; algunas propiedades son medidas sobre ligantes sin envejecer. Se utiliza el RTFO para simular la oxidación que ocurre en el mezclado en caliente y colocación. Un equipo de envejecimiento a presión (PAV) se usa en laboratorio para

simular el severo envejecimiento que sufre el ligante después de varios años de servicio en el pavimento.

Las propiedades físicas de los ligantes son medidas con 4 dispositivos:

- Reómetro de corte dinámico (DSR).
- Viscosímetro rotacional (RV).
- Reómetro de flexión (BBR).
- Ensayo de tracción indirecta (DDT).

- Agregados minerales.

El agregado mineral juega un papel muy importante en el desempeño de la mezcla asfáltica. Si bien SUPERPAVE no desarrollo ningún nuevo procedimiento, si refinaron los procedimientos existentes para adaptarlos a este. Dos tipos de propiedades de los agregados se especifican en el sistema SUPERPAVE: propiedades de consenso y propiedades de origen del agregado.

Las propiedades de consenso son aquellas consideradas por los investigadores de SHRP críticas para alcanzar un elevado desempeño de la mezcla asfáltica. Estas propiedades deben de cumplirse en varias escaladas, dependiendo del nivel de tránsito y de la posición en el paquete estructural del pavimento. Altos niveles de tránsito y mezclas para la carpeta de rodamiento (posición superior en el paquete estructural del pavimento) requieren de valores más estrictos para las propiedades de consenso. Estas propiedades son:

- Angularidad del agregado grueso.
- Angularidad del agregado fino.
- Partículas lajeadas y alargadas.
- Contenido de arcilla.

Especificando la angularidad de los gruesos y los finos, se pretende lograr una mezcla con un alto ángulo de fricción interna y así, una alta resistencia al corte y por ende una alta resistencia al ahuellamiento. El ángulo de reposo de de una pila de agregado triturado es mayor que el de una pila de material no triturado, figura 2.4. Limitando las partículas se asegura que los agregados de la mezcla serán menos susceptibles a la fractura durante el manipuleo, construcción y bajo tránsito. Limitando la cantidad de arcilla en el agregado, la unión entre el ligante asfáltico y el agregado es fortalecida y mejorada.

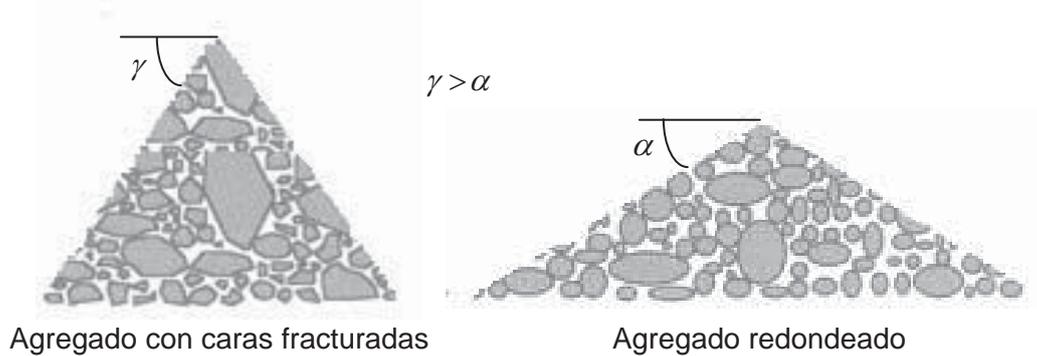


Figura 2.4 Comportamiento de las pilas de acopio de agregados con caras fracturadas y redondeados.
(fuente: Asphalt Institute, 1998)

Las propiedades de origen de los agregados son aquellas utilizadas frecuentemente por las agencias para calificar las fuentes locales de agregados. Los investigadores de SHRP creyeron que el cumplimiento de estas propiedades era importante, pero no especificaron valores críticos ya que ellas son muy específicas de la fuente de origen. Las propiedades de origen del agregado son:

- Tenacidad.
- Durabilidad.
- Materiales deletéreos.

La tenacidad se mide con el ensayo del desgaste de los Ángeles; la durabilidad se mide con el ensayo de durabilidad por acción del sulfato de sodio o magnesio. La presencia de materiales deletéreos se mide con el ensayo de determinación de terrones de arcilla y de las partículas friables.

Para especificar la graduación del agregado el método depuró una propuesta ya de amplio uso: exponente 0.45 en la gráfica de granulometría, con límites de control y una zona restringida.

El diseño de la estructura del agregado del SUPERPAVE debe de pasar entre los puntos de control evitando la zona restringida. El tamaño máximo nominal se define como un tamaño mayor que el correspondiente a la medida del primer tamiz que retiene más del 10%. El tamaño máximo del agregado se define como un tamaño mayor que el tamaño del agregado máximo nominal.

La zona restringida es usada para evitar mezclas con alto contenido de arenas finas en relación al total de la arena y para evitar graduaciones que siguen la línea del exponente 0.45, las cuales normalmente carecen de una adecuada cantidad de vacíos del agregado mineral (VAM). En muchos casos, la zona restringida desalentará el uso de arenas finas naturales en una mezcla

de agregados. La estructura del agregado diseñada asegurará que el agregado desarrollará un esqueleto granular fuerte mejorando la resistencia a la deformación permanente a la vez que permite un suficiente volumen de vacíos para garantizar la durabilidad de la mezcla.

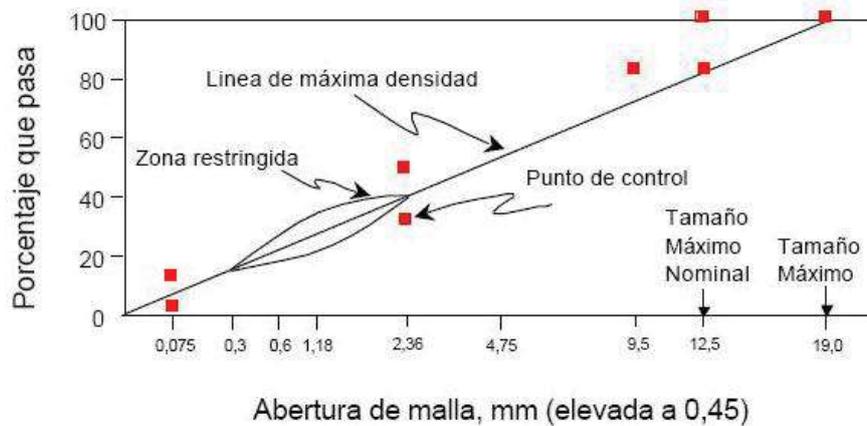


Figura 2.5 Límites granulométricos SUPERPAVE para una mezcla de 19 mm .
(fuente: Asphalt Institute, 1998)

- Mezclas asfálticas.

Dos aspectos claves en el sistema SUPERPAVE son la compactación en el laboratorio y los ensayos de desempeño. La compactación en el laboratorio se realiza con el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC). Su principal función es compactar las probetas de ensayo; no obstante con los datos que provee el SGC durante la compactación, un ingeniero en diseño de mezclas puede hacerse una idea de la compactabilidad de la mezcla asfáltica.

El SGC puede usarse para diseñar mezclas que no exhiban un comportamiento débil (muy fácilmente compactables) y no se densifiquen, bajo la acción del tránsito, a un peligroso bajo contenido de vacíos.

El desempeño de la mezcla asfáltica inmediatamente después de la construcción es influida por las propiedades de la mezcla resultantes del mezclado en caliente y de la compactación. Consecuentemente, un protocolo para envejecimiento a corto plazo fue incorporado para el sistema SUPERPAVE: la mezcla suelta, antes de ser compactada por el SGC, debe ser envejecida en horno, a 135°C, durante 4 horas.

Los procedimientos de ensayo y los modelos de predicción del desempeño fueron desarrollados de modo que permiten a un ingeniero estimar la vida en servicio de una mezcla asfáltica en términos de ejes equivalentes (ESALs) o del lapso para alcanzar un cierto nivel de ahuellamiento, fisuramiento por fatiga o fisuramiento por baja temperatura.

Dos nuevos procedimientos de ensayo basados en la performance fueron desarrollados: el Ensayo de Corte SUPERPAVE (SST) y el Ensayo de Tracción Indirecta (IDT). Los resultados de estos ensayos (output) son valores de entrada (input) de los modelos de predicción de la performance en el SUPERPAVE para estimar el desempeño real de los pavimentos.



Figura 2.6 Predicción de la performance del pavimento de SUPERPAVE (fuente: Asphalt Institute, 1998).

Con el SST se realizan los siguientes 6 ensayos sobre las muestras de mezcla asfáltica:

- Ensayo volumétrico.
- Ensayo de deformación específica uniaxial.
- Ensayo de corte simple a altura constante.
- Ensayo de corte repetido a tensión constante.
- Ensayo de barrido de frecuencias a altura constante.
- Ensayo de corte repetido a altura constante.

En los primeros dos ensayos el espécimen está sometido a una presión de confinamiento. Para esto el SST tiene una cámara que aplica presiones por medio de aire comprimido; la temperatura de ensayo es también cuidadosamente controlada por medio de la cámara de ensayo. El SST tiene accionadores hidráulicos horizontales y verticales acompañados de transductores diferenciales de variación lineal (LVDT) para medir la respuesta del espécimen bajo la carga.

Los ensayos realizados con el SST son ejecutados a varias temperaturas para simular las temperaturas reales del pavimento. Si bien una parte de los ensayos apunta al fisuramiento por fatiga, el SST es primeramente una herramienta de diseño para evitar las deformaciones permanentes.

El IDT es usado para medir el "creep compliance" y la resistencia a tracción de la mezcla asfáltica. Este ensayo usa un accionador simple vertical para cargar la probeta a lo largo de su plano diametral. La caracterización de la mezcla asfáltica por medio del IDT es una herramienta para el diseño contra el fisuramiento, tanto por fatiga como por baja temperatura.

Usando los modelos de desempeño de pavimentos los ingenieros de diseño de mezclas pueden estimar el efecto combinado de ligante asfáltico, agregados y proporciones de las mezclas. El modelo tiene en cuenta la estructura, condiciones y propiedades del pavimento existente (de ser aplicables) y el volumen de tránsito al que la mezcla propuesta estará sometida a lo largo de su vida en servicio. El resultado de los modelos se expresa en mm de ahuellamiento, porcentaje del área fisurada por fatiga y en metros de espaciamiento de las fisuras por bajas temperaturas. El sistema SUPERPAVE empalma las propiedades de los materiales con las propiedades de la estructura del pavimento para predecir el real desempeño del pavimento. Así, las ventajas (o desventajas) de nuevos materiales, el diseño de una mezcla diferente, asfaltos modificados y otros productos pueden ser cuantificados en términos de costo versus desempeño.

2.8.- Funcionalidad de las Mezclas Asfálticas.

Las mezclas asfálticas soportan directamente las acciones de los neumáticos de los vehículos y transmiten de forma adecuada las cargas a las capas inferiores; proporcionando unas condiciones adecuadas de rodamiento, cuando se emplean en las capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas inferiores.

Si se utiliza como material simplemente estructural se puede caracterizar de diferentes 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 o 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.

Las cualidades funcionales de la mezcla asfáltica residen esencialmente 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:

- La adherencia del neumático a la carpeta.
- Las proyecciones del agua en épocas de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior de los vehículos.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tránsito.
- La resistencia a la rodadura.
- El envejecimiento de los vehículos.
- Las propiedades ópticas.

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

2.9.- Evaluación de la Superficie de Rodamiento.

Se lleva a cabo mediante un estudio de las condiciones superficiales que presenta un pavimento, estableciendo una apreciación de su capacidad para prestar un servicio desde el punto de vista de su transitabilidad. La evaluación de esta cualidad es un problema complejo en el que intervienen otros sistemas interrelacionados entre sí: el usuario, el vehículo y la rugosidad del

pavimento, entendiéndose por este último, como las irregularidades en la superficie de un pavimento que influye en la calidad del rodamiento.

Los estudios a realizar son los siguientes:

1. La apreciación subjetiva de la transitabilidad del pavimento, efectuada mientras se conduce un vehículo a velocidad normal.
2. La medición de la rugosidad del pavimento.
3. Valoración de los deterioros superficiales, mostrando la ubicación y la extensión de los aspectos observados.

Los ingenieros de la prueba AASHO, desarrollaron un método para la apreciación del estado superficial del pavimento, basado en el concepto de servicio actual, para un tramo específico de pavimento, el servicio actual es la capacidad que se tiene, según la opinión del usuario, para proporcionar un tránsito suave y cómodo en condiciones normales de operación.

El método requiere que un grupo de cinco personas como mínimo, efectúe un recorrido por el pavimento, previamente dividido en secciones. Basándose exclusivamente en las condiciones superficiales del pavimento y en el hecho de que éste deberá prestar servicio a un volumen de tránsito mezclado bajo cualquier condición de tiempo, las personas que integran el grupo, deberán emitir una calificación del pavimento, variable entre cero para muy malo y cinco para muy bueno.

Las bases en que se apoya este método son las siguientes:

1. Las carreteras se construyen para conveniencia y comodidad del usuario.
2. La opinión del usuario en torno a la forma en que le da servicio una carretera, es enteramente subjetiva.
3. Las características que pueden medirse en una carretera, analizada y manejada convenientemente, puede relacionarse con la opinión subjetiva del usuario.
4. El servicio dado por una carretera puede expresarse por el promedio de la evaluación efectuado por los usuarios de la misma.
5. El comportamiento de un pavimento puede establecerse a partir de las observaciones periódicas del servicio desde el momento de su construcción hasta el momento que se desee.

De los resultados de la prueba AASHO se obtuvo que la rugosidad de un pavimento o su perfil, se encuentran estrechamente relacionados con la apreciación de su servicio y que el comportamiento del pavimento evaluado en esta forma, se encuentra correlacionados con ciertos factores de diseño.

Para la medición de la rugosidad o bien, de las deformaciones de la superficie del pavimento se han diseñado dispositivos que permiten la evaluación en forma rápida y mecánica. Los valores obtenidos en esta forma han sido correlacionados con las calificaciones obtenidas de la forma antes descrita, obteniéndose un valor numérico llamado índice de servicio actual (descrito en el capítulo anterior).



Capítulo 3.

Deformaciones Permanentes.

3.1.- Antecedentes.

En pavimentos las deformaciones interesan desde dos perspectivas: primeramente, las deformaciones excesivas están conjuntamente asociadas a estados de falla, y por otro porque como ya se ha mencionado anteriormente un pavimento deformado puede dejar de cumplir, sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso de la estructura del pavimento.

En la actualidad, de acuerdo a diversos estudios realizados por especialistas del medio, se consideran dos principales tipos de deterioros de los pavimentos flexibles: la fisuración (por fatiga o por efectos térmicos), y las deformaciones permanentes (conocidas como ahuellamientos o roderas). Se tiene bien sabido que a pesar de que los ahuellamientos generalmente no inducen a la falla estructural de un pavimento, si influyen de manera significativa en la disminución de la calidad de servicio, acortando su vida efectiva para la cual fue diseñado.

El efecto de la deformación acumulativa resulta de la deformación que el pavimento sufre bajo la acción de la llanta que pasa. Tal deformación se recupera parcialmente cuando la llanta deja de oprimir, pero dicha recuperación nunca es total; siempre queda un remanente, el cual conduce a la deformación permanente, esta dificulta la marcha de los vehículos, aumentando su costo operativo y, eventualmente, contribuye a la ruptura y agrietamiento de la carpeta asfáltica.

Las roderas pueden ser ocasionadas principalmente por tres factores: deformación de las capas inferiores, consolidación de las capas asfálticas superiores y desplazamiento de las mezclas asfálticas superiores.

En el caso de que el problema de ahuellamiento este circunscrito a la capa de mezcla asfáltica que forma la capa de rodadura del pavimento. Esta capa, con un diseño o compactación inadecuados, sufre deformaciones considerables con el tránsito canalizado, lo que, unido al comportamiento de carácter plástico de la mezcla con temperaturas altas, provoca que se presente un desplazamiento de la mezcla en la zona de la rodada a las zonas laterales, formándose una protuberancia de material característico, a los lados de dicha zona de la rodada.

Tal y como se ha descrito es una degradación originada por un mal diseño de la mezcla asfáltica, fabricada inadecuadamente y por lo tanto roderable con temperaturas altas y tránsito canalizado.

La práctica actual del análisis y diseño de pavimentos flexibles se basa en métodos básicamente empíricos, en donde el diseño se respalda en propiedades físicas de los materiales y algún índice de resistencia.

Una política racional de diseño en el México actual debe llevar a secciones estructurales de suficiente calidad como para que las acciones de conservación asociadas al crecimiento del tránsito consistan en simples y mucho mas económicos refuerzos en la superficie, sin necesidad de realizar auténticas reconstrucciones de las secciones estructurales o de tener que reasignar a una carretera en la que, hayan que realizarse reencarpetados frecuentes, se encuentren siempre en malas condiciones de rodamiento, con una repercusión desfavorable en los continuos y enormes costos de operación vehicular.

Debe señalarse que la actual tecnología usada para el diseño de pavimentos flexibles en México, permite cuantificar la mayoría de las magnitudes de influencia en el deterioro de los pavimentos, permitiendo llegar a diversas alternativas que garanticen tanto distintos niveles de calidad de rodamiento, como diferentes tiempos en que la calidad inicial seleccionada llegue a la calidad mínima que se considere apropiada para una carretera particular, según su importancia, la que al ser alcanzada exija una nueva acción de refuerzo superficial.

A continuación se describirá brevemente la importancia de las deformaciones permanentes para algunos métodos de diseño de pavimentos flexibles.

El método del Instituto de Ingeniería de la UNAM (DISPAV), el cual presenta los siguientes postulados básicos:

- ❖ Planteamiento mecanicista para las dos formas principales de falla de los pavimentos:

Un modelo rígido plástico y los criterios de capacidad de carga de Terzaghi, para estimar la deformación permanente a largo plazo de las capas de pavimento no

tratadas con ligantes. El modelo teórico-empírico concuerda con la experimentación a escala natural.

Un modelo elástico para determinar el comportamiento del camino, basado en la falla por agrietamiento a fatiga de las capas ligadas con asfalto, tomando en cuenta a deformación unitaria crítica a tensión en esas capas.

- ❖ Un enfoque probabilista para estimar los niveles de confianza apropiados.
- ❖ Cálculo analítico de los factores de daño por camión. El modelo toma en cuenta carga total, tipo de eje, presión de llanta, y la profundidad a la cual se estima el factor de daño relativo.
- ❖ Caracterización de los materiales con base en su comportamiento real a largo plazo en el camino.

El método de diseño actualizado incluye, entre otras características:

- a) Modelos de deterioro para estimar la deformación permanente del pavimento a la falla, basados en pruebas a escala natural en el campo y en el laboratorio.
- b) Modelos para determinar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, basados en la extensa investigación realizada en el Instituto, tomando en cuenta las condiciones particulares de clima y tránsito de México.

Comparado con otros reconocidos métodos internacionales para el diseño de pavimentos los resultados son satisfactorios, tanto para caminos normales como para carreteras de altas especificaciones.

Entre las adiciones incluidas, respecto al método original, publicado en 1974, está la de incorporar de manera explícita un modelo mecanicista para determinar las deformaciones unitarias de fatiga, basado en los estudios experimentales realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM, sobre mezclas asfálticas típicas durante los años 1985 a la fecha.

También se agrega un nuevo modelo desarrollado para diseñar estructuras de carreteras de altas especificaciones tomando en cuenta tanto la deformación permanente acumulada (rodera) como el agrietamiento a fatiga en las capas ligadas con asfalto. El modelo original para caminos normales, no sufrió cambios adicionales y también está incorporado al DISPAV-5.

El método de diseño está fundamentado en la extensa experimentación realizada a escala natural, tanto en el campo como en el laboratorio, y los estudios analíticos llevados a cabo dentro del

programa experimental del Instituto de Ingeniería, UNAM. Al comparar sus predicciones con diversos criterios ampliamente reconocidos en el extranjero, los resultados son satisfactorios.

En lo que se refiere al diseño por deformación permanente es importante señalar que el método previene la deformación excesiva en las capas no estabilizadas con asfalto (base, sub-base, subrasante y terracería). Además, se considera que las mezclas asfálticas se han proyectado de manera cuidadosa y que por tanto las deformaciones de las capas asfálticas son relativamente pequeñas.

Debe mencionarse que existe una alta dependencia entre las características mecánicas de las mezclas asfálticas y las variaciones climáticas en la carretera, combinadas con la frecuencia e intensidad de las sollicitaciones del tránsito. Debido a este problema existen variaciones muy altas en los módulos de rigidez (o módulos "elásticos") de las mezclas asfálticas durante la vida de servicio del camino.

La determinación del "módulo de rigidez equivalente", que representa las condiciones normales de la carretera durante las diferentes épocas del año, presenta una dificultad significativa para su determinación, en todos los métodos de diseño, y en la práctica este es uno de los factores de diseño que requiere experimentación amplia y buen juicio del proyectista para llegar a un proyecto adecuado.

Para resolver dicho problema, se requiere zonificación de la carretera, análisis por estación climática y estudios analíticos, aplicando la ley de Miner para determinar el "módulo de rigidez equivalente" de las capas asfálticas, que produce el mismo comportamiento estructural de la carretera que el que ocurre en la realidad, donde las variaciones de módulo de rigidez se presentan durante las diferentes horas del día y de la noche, con fuertes diferencias según la zona geográfica y la estación del año.

En consecuencia, el método de diseño estructural del Instituto de Ingeniería, UNAM, presupone un proyecto adecuado de las mezclas asfálticas, mediante el proporcionamiento cuidadoso de las mismas y la elección adecuada de los materiales empleados en ellas.

La prevención de este tipo de deformación en las capas asfálticas es de mucha importancia cuando las temperaturas son altas y los espesores son gruesos, sobre todo si el tránsito es de tipo pesado.

Al aplicar el método de diseño estructural del Instituto de Ingeniería, UNAM, debe tenerse suficiente información sobre los insumos requeridos, ya que la confiabilidad de los resultados del cálculo depende de que los datos empleados sean representativos de las propiedades esperadas de los materiales en el lugar, durante la vida de servicio de la obra vial.

En los párrafos anteriores se exponen los principios fundamentales del método, es importante recalcar como el método solo se enfoca al análisis de las deformaciones permanentes en capas granulares, y evita todo análisis de capas asfálticas. Ya que este supone que se llevó a cabo un buen diseño en la mezcla asfáltica y no presentará deformaciones plásticas considerables que afecten la estructura. De ahí la importancia de la presente investigación ya que esta se enfoca al

análisis de las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas mediante un ensayo de simulación que puede contribuir al buen diseño de las mezclas, y de esta forma dar mayor confiabilidad al método de diseño DISPAV-5.

A continuación se describirán las metodologías que los métodos mecanicistas pretenden introducir para el diseño de los pavimentos.

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología nos permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de nuestros diseños.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de cada capa; las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes; el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura; y el nivel de tránsito vehicular definido ya sea en ejes equivalentes o, preferentemente, a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de lo que vamos a llamar las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ) y deflexiones (δ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad.

A partir de la respuesta estructural en el pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los diferentes tipos de deterioro que se pudieran presentar; estos deterioros pueden ser agrietamientos por fatiga; agrietamientos térmicos; deformaciones permanentes; escalonamiento en el caso de pavimentos de concreto y, finalmente, el nivel de regularidad medido a través del llamado Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se comparan con los valores máximos permitidos por el diseñador, que dependerán por supuesto del tipo de camino del que se trate. Para caminos de altas especificaciones, especialmente en los caminos de cuota, la exigencia deberá ser mayor. Como fue expresado anteriormente, la idea fundamental es la de poder garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento, deformación permanente, escalonamiento, regularidad superficial, etc, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

Por supuesto que la implementación de los conceptos anteriores no es inmediata, ya que necesita entre otras cosas, de la disponibilidad de equipos modernos de laboratorio y campo que permitan la evaluación de las propiedades que son necesarias, pero sobre todo, y es quizá lo más importante, se necesita de la calibración y validación de los modelos de deterioro. Esto significa que se requiere el monitoreo de tramos de pavimentos representativos en México, que permita la determinación de los coeficientes de ajuste necesarios para poder predecir, con la confiabilidad necesaria, la evolución de los niveles de agrietamiento, deformación permanente, etc. Por lo mencionado anteriormente en este párrafo es de vital importancia continuar con la investigación de los diferentes deterioros; estudio al que se enfoca esta investigación para así poder complementar este tipo de métodos.

En muchos países se presenta con frecuencia la necesidad de evaluar el estado de un pavimento construido anteriormente con el fin de deducir sobre de la necesidad de repararlo y sobre el monto de la reparación.

El conocimiento de las condiciones en que se encuentra un pavimento, es un aspecto que en la actualidad interesa a los ingenieros y personal encargado de su diseño y conservación, incluyendo en forma especial a los usuarios; consiente o inconscientemente, el usuario califica las condiciones en que se encuentra un pavimento cada vez que conduce un automóvil.

Son diversas las razones y motivos de estudiar y conocer las condiciones en que se encuentra un pavimento, pudiendo señalar entre otras las siguientes:

1. Al ingeniero que ha realizado el proyecto del pavimento, le ayuda a determinar el grado de éxito alcanzado por su proyecto, al culminar con los criterios de diseño y en su caso, le ayuda a comprender las causas de su fracaso.
2. Sirve para planear un programa óptimo de mantenimiento y establecer la necesidad de realizar trabajos de conservación mas importantes, reconstrucción y de reubicación del camino.
3. Permite realizar un pronóstico de la vida útil del pavimento.
4. Ayuda a determinar la capacidad del pavimento para soportar un volumen de tránsito, permitido así mismo, efectuar la actualización del pavimento, acorde con las futuras necesidades de tránsito.
5. Sirve para estimar el refuerzo que un pavimento deteriorado requiere para funcionar adecuadamente.
6. Contribuye a una buena base para el establecimiento de nuevos conceptos, importantes en el diseño de pavimentos.

Los estudios efectuados para la evaluación de un pavimento pueden clasificarse en dos grupos:

- A. Estudios del comportamiento funcional, desde el punto de vista de su operación y servicio.
- B. Evaluación mecanicista, desde el punto de vista de su capacidad estructural.

Los primeros proporcionan un juicio para valorar el grado en que un pavimento es adecuado para su transitabilidad. Los segundos permiten efectuar la evaluación estructural del pavimento, proporcionando la información suficiente para poder diseñar el refuerzo que en su caso llegara a requerir; este tipo de evaluación también se puede realizar de forma muy aproximada a través de ensayos de pista a escala real y en el caso de las mezclas asfálticas se puede estimar su desempeño por medio de los ensayos denominados de simulación, con resultados muy aproximados a los obtenidos a través del estudio de tramos reales en servicio.

3.2.- Deformaciones Permanentes.

La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación "permanente" pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga; esta deformación es irrecuperable.

Las deformaciones plásticas dan origen a las roderas o ahuellamientos estas se presentan en forma de surcos que se desarrollan sobre los pavimentos en los carriles de las ruedas. Las roderas pueden ser el resultado de una consolidación o movimiento lateral de una o mas capas del pavimento bajo efectos del tránsito, o pueden ser generadas por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Pueden ocurrir bajo efectos del tránsito en pavimentos asfálticos nuevos que han tenido muy poca compactación durante su construcción, o como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tránsito.

Cuando una mezcla asfáltica se ahuella, es evidente que tiene una baja resistencia al corte. Cada vez que un camión aplica una carga, una deformación pequeña, pero permanente, se ocasiona; la deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Con un número dado de repeticiones de carga aparecerá el ahuellamiento. Los pavimentos asfálticos ahuellados tienen una seguridad deficiente porque los surcos que se forman retienen suficiente agua para producir hidropilaje o acumulación de hielo.

El ahuellamiento de las mezclas asfálticas débiles es un fenómeno asociado a las altas temperaturas; si bien esto podría sugerir que es un problema del asfalto, es más correcto enfocarlo como un problema conjunto del agregado mineral y del asfalto.

El comportamiento de las mezclas asfálticas ante la formación de ahuellamientos esta relacionado directamente con características del ligante asfáltico empleado, así como de la composición granulométrica y calidad de los agregados, y en algunos casos de los aditivos empleados en la fabricación de la mezcla.

La deformación permanente es la manifestación de dos diferentes mecanismos: densificación (cambio de volumen) y deformación cortante (flujo plástico sin cambio de volumen).

En el proceso de densificación el material es desplazado hacia abajo; mientras que la deformación cortante provoca que el material fluya lateralmente y hacia arriba, como se observa en la figura 3.1.

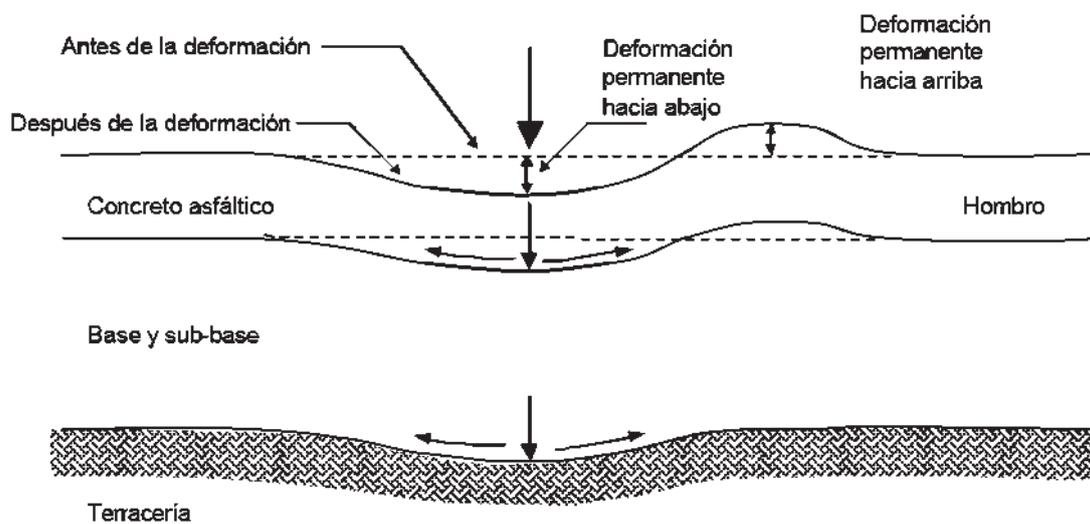


Figura 3.1 Mecanismo típico en la deformación permanente.

La profundidad total de la rodera es la diferencia en elevación entre la cresta y la hondanada de la superficie. Como se observa en la figura, los esfuerzos de tensión sobre la superficie y el lado exterior del área cargada pueden ocasionar grietas longitudinales en la mezcla asfáltica.

3.3.- Tipos de Deformaciones Permanentes.

Las deformaciones permanentes se dividen de acuerdo a la zona donde se presentan en un pavimento, pueden ser deformaciones en las capas inferiores y deformaciones en las capas de asfalto; estas últimas a su vez se subdividen en deformaciones por desplazamiento de la mezcla asfáltica y deformaciones por consolidación de las capas superiores.

3.3.1.- Deformación Mecánica.

Es el resultado de un hundimiento causado por muchas aplicaciones repetidas de carga a la subrasante, la sub-base, o la base por debajo de la carpeta asfáltica. Si bien el uso de materiales con características que posean más rigidez, disminuye parcialmente este tipo de roderas, este fenómeno es considerado principalmente un problema estructural, que debido a los materiales. Usualmente, es el resultado de una sección de pavimento insuficiente, para reducir a niveles tolerables los esfuerzos sobre la subrasante cuando se aplican las cargas. Podría ser también el resultado de una subrasante debilitada por el ingreso de agua.



Figura 3.2 Deformación permanente en capas inferiores (Asphalt Institute, 1998).

Las cargas de tránsito provocan hundimiento y debilitamiento, por debajo en la de la estructura del pavimento. Si la capa de mezcla asfáltica es demasiado flexible, se deformara por tener espesores delgados. Los hundimientos provocados por este tipo de deformación permanente, presenta anchos que van desde 750 mm hasta 1000 mm, con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección de la mezcla asfáltica sin agrietarse. Si se hiciera un corte la deformación del pavimento indicaría, que el espesor de la mezcla permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o sub-base) tiene deformaciones. Si la estructura del pavimento es demasiado rígida a la deformación, ocurrirán grietas por fatiga de un lado a otro en el ancho entero de la trayectoria del neumático.

Algunas veces atravesando toda la sección del pavimento, parecería un tipo de falla por punzamiento, con piezas quebradas empujadas hacia abajo. Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la llanta.

3.3.3.- Deformación Plástica.

Este tipo de roderas es el que mas preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, generalmente se produce por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales esta sometida, esta va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una depresión o surco cercano al centro de la carga aplicada, con ligeros montículos o protuberancias ubicados al lado de la depresión.

Cuando las roderas son provocadas por el desplazamiento de la mezcla asfáltica se dice que esta tiene falta de estabilidad. Esta depende sobre todo, de la fricción interna y la cohesión; la primera depende de la textura superficial, forma de la partícula, granulometría del agregado, densidad de la mezcla y la cantidad, y tipo de asfalto. Mientras que la cohesión depende del contenido de asfalto, esta se incrementa con el aumento del contenido de asfalto, hasta un punto óptimo, después del cual el incremento del asfalto forma una película demasiado gruesa en las partículas de asfalto, produciendo de esta forma una pérdida de fricción entre las partículas de agregado.

Las roderas de 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 las altas temperaturas, debido al efecto que producen en el asfalto, sin embargo es más correcto pensar, que es una combinación de los agregados pétreos y el ligante asfáltico.

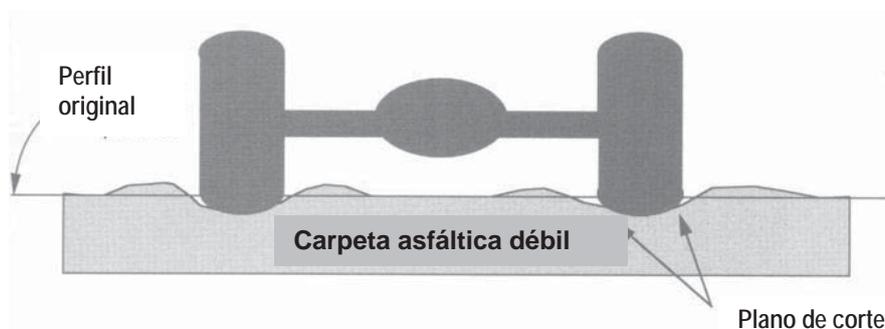


Figura 3.3 Deformación permanente en capas asfálticas (Asphalt Institute, 1998).

Los ahuellamientos como se ha dicho son pequeñas deformaciones permanentes acumuladas y una manera de incrementar la resistencia hacia el deslizamiento es no solamente utilizar asfaltos más duros, sino otro que se comporte mas como un solido elástico a altas temperaturas. Así cuando la carga se aplique el material podrá deformarse y volver a su posición original. En cuanto al agregado mineral se refiere, es más conveniente seleccionar agregados que tengan un alto grado de fricción interna; esto se logra eligiendo un agregado que sea cúbico, que tenga una superficie rugosa y con

una granulometría tal que se desarrolle un buen contacto partícula-partícula. Cuando se 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 en el caso del asfalto, el agregado actuará como una banda de goma y volverá a su forma original cuando desaparezca la carga.

3.3.2.- Deformación por Consolidación.

Como la anterior es una depresión cercana a la aplicación de la carga con forma de surco, pero sin acompañamiento de protuberancias al lado del surco. Este tipo de deformación longitudinal se debe principalmente al exceso de vacíos de aire (mayores del 8%) en la carpeta, después de la compactación. Esta condición provoca que la mezcla asfáltica se envejezca por efectos de la oxidación debido a causas como el aire, agua y las altas temperaturas, consolidándose a lo largo de las huellas que dejan las ruedas de los vehículos, especialmente durante el primer verano.

3.4.- *Proceso de Formación de Roderas.*

Cuando los ahuellamientos son causados por deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas, el material asfáltico es desplazado lateralmente a lo largo de la trayectoria de las ruedas de los vehículos en el plano de la mezcla, y la rodera se forma por depresión en el área de carga por donde circula el neumático o los neumáticos, dejando protuberancias o crestas de mezcla en ambos lados a lo largo de la trayectoria de los vehículos. Al suceder esto la superficie por dentro de la trayectoria del neumático generalmente está lisa y rica en asfalto. Y por otro lado el fondo de la rodera tal vez sea lisa y en forma de cuchara. En muchas ocasiones se producen pequeñas crestas de mezcla asfáltica entre los espacios de las llantas duales. Los ahuellamientos generados por desplazamiento de la mezcla tienden a cambiar a lo largo de la carretera, por lo tanto el pavimento continúa proporcionando el servicio de rodadura a pesar de tener ahuellamientos; aunque con un decremento significativo de su índice de servicio.

La aparición de ahuellamientos como ya se ha mencionado antes es generada por la falta de resistencia ante las cargas producidas en la mezcla asfáltica, principalmente cargas verticales. En ocasiones la falta de resistencia puede ser causada por el desequilibrio entre el asfalto y la mezcla; dicho desequilibrio puede ser generado por daños de humedad en la mezcla asfáltica o debilitamiento del esqueleto en el agregado mineral. Las roderas en los materiales del pavimento se desarrollan gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga.

La utilización de materiales para la superficie de un pavimento, con una alta densidad, reside en la importancia de poder reducir la magnitud de las deformaciones permanentes. Estudios de investigación mencionan que los ahuellamientos principalmente son causados por flujos de deformación acompañados de cambio de volumen.

En la figura 3.4 se observa el efecto sobre una mezcla asfáltica debido al número de pasadas de un neumático en un ensayo de simulación. Estos datos permiten hacer mediciones del promedio de las profundidades de las roderas, además del volumen de material desplazado por debajo de las llantas y por encima de las zonas adyacentes a ellas. Con esta información y a partir del análisis de la figura, podemos obtener las siguientes conclusiones:

1. A partir del escenario inicial de tránsito, el incremento en las deformaciones de carácter irreversible (plásticas), por debajo de los neumáticos es significativamente mayor en comparación con el incremento en las zonas localizadas por encima de la superficie. En esta etapa inicial, la compactación debida al tránsito, tiene una mayor influencia en las roderas.
2. Pasado el escenario inicial de tránsito, el volumen que disminuye por debajo de las llantas es relativamente igual que el volumen que se incrementa por los bordes en la parte superficial de la mezcla. Esto es indicador de que en gran medida la compactación se lleva a cabo bajo las sollicitaciones de tránsito y de que los ahuellamientos son causados principalmente por un desplazamiento con volumen constante. Esta etapa se consideró particularmente para así poder representar el comportamiento de la deformación en el tiempo de vida de la mezcla asfáltica.

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.

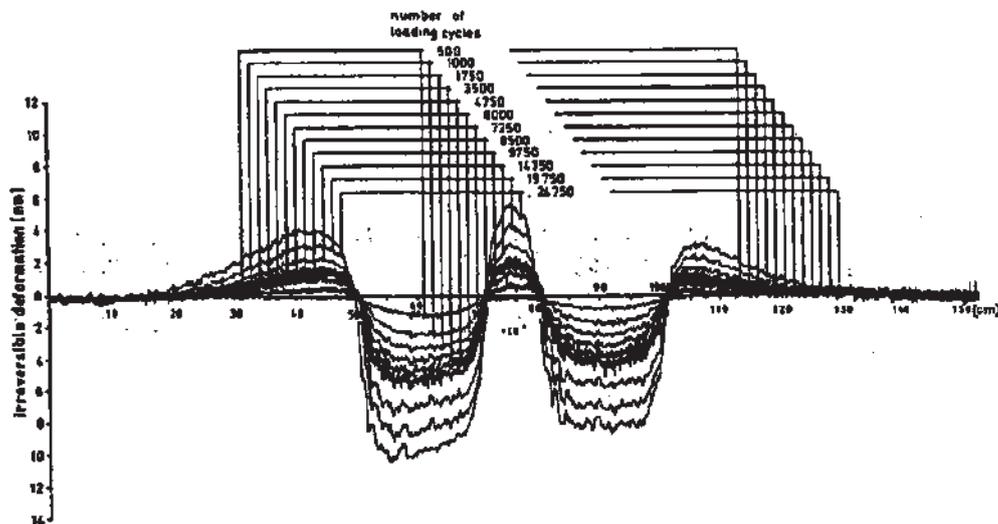


Figura 3.4 Proceso de formación de roderas en mezclas asfálticas (fuente: Hofstra y Klomp, 1972).

Los ahuellamientos son causados básicamente por flujo plástico, a mayor profundidad en 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 mezcla asfáltica, aumenta en proporción de que el espesor de dicha mezcla disminuya.

La mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos y asfalto; por tanto, el comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado tanto por las propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación de ambos componentes dentro del sistema.

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregado de naturaleza elastoplástica, estas son las que soportan las cargas del tránsito principalmente y por un ligante de naturaleza viscoelástica, que actúa como aglutinante manteniendo unido al esqueleto mineral.

Como resultado de la naturaleza de la integración de los comportamientos de sus componentes, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico (figura 3.5). Por un lado, el agregado pétreo tiene un comportamiento elastoplástico y por el otro, el mástico (asfalto mas polvo mineral) tienen un comportamiento viscoelástico. Por lo tanto, las mezclas asfálticas poseen un comportamiento que se puede llamar visco-elástico-plástico (Cepeda 2002).

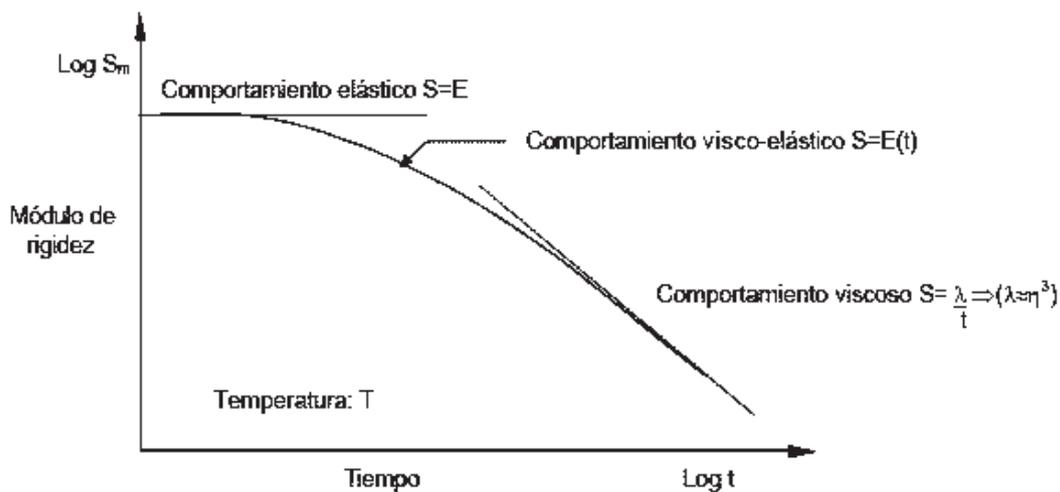


Figura. 3.5 Comportamiento de las mezclas asfálticas en función del tiempo (fuente: Cepeda, 2002).

El ligante asfáltico no puede resistir las cargas del tránsito por sí solo, pues debido a su naturaleza visco-elástica puede fluir en función de la carga y del tiempo de aplicación de esta, sin embargo el ligante 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 ligante no es capaz de mantener las partículas en su sitio, estas pueden desplazarse compactando el esqueleto mineral a una configuración más densa.

Tomando como parámetros la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga las mezclas asfálticas pueden presentar un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso. A bajas temperaturas el comportamiento de la mezcla es básicamente elástico lineal, y al ir elevándose la temperatura se presenta un comportamiento elástico no lineal, de seguir esta tendencia ascendente de la temperatura aparece el comportamiento viscoso de la mezcla.

- ❖ En invierno, cuando las temperaturas son bajas no existen deformaciones plásticas, debido a que la mezcla se comporta de forma elástica.
- ❖ En otoño y primavera, cuando generalmente existen temperaturas intermedias, la mezcla tiene un alto porcentaje de comportamiento elástico y las deformaciones plásticas son mínimas.
- ❖ En verano, cuando existen altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones producidas por el tránsito incrementan. Parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, siendo de carácter irre recuperable y dando origen a las deformaciones plásticas o roderas.

En la figura 3.6 se presenta el cambio en el comportamiento de una mezcla asfáltica en función de su temperatura de servicio.

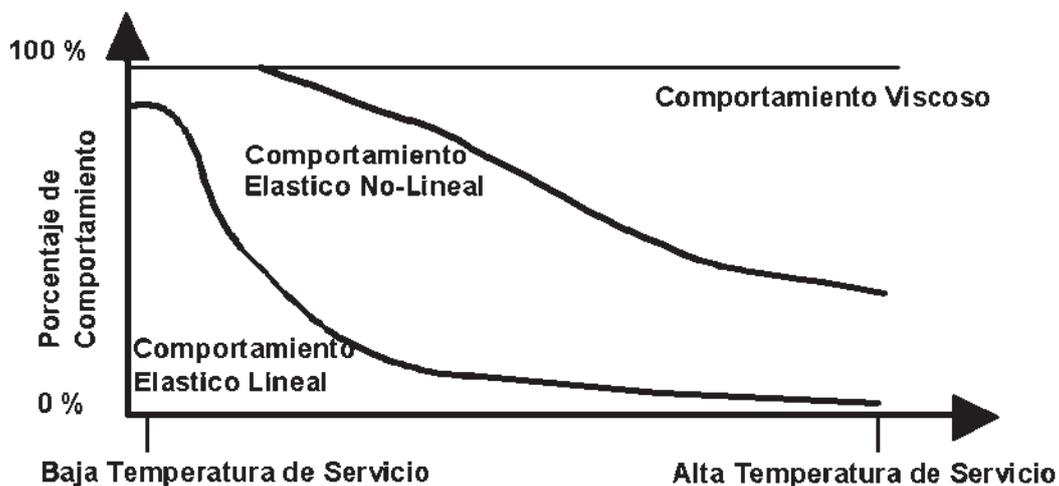


Figura 3.6 Comportamiento de las mezclas asfálticas en función de la temperatura.
(fuente: Padilla, 2004).

Normalmente la magnitud de las deformaciones permanentes es baja y no supone ningún problema, sin embargo si las deformaciones alcanzan niveles muy elevados o la mezcla presenta un comportamiento predominante viscoso las deformaciones permanentes pueden ser muy significativas. Y pueden llegar a ser un factor de gran influencia para disminuir la vida efectiva del pavimento, además de causar una pérdida significativa en la calidad del servicio.

3.5.- Causas que Intervienen en la Formación de Roderas.

Existe una variedad de causas por las cuales se presenta la formación de las deformaciones plásticas o ahuellamientos en las mezclas asfálticas, algunas de las cuales se describirán a continuación. Es muy importante indicar que las causas que se mencionarán deberán tomarse en cuenta al momento de diseñar una mezcla asfáltica y la construcción de los pavimentos flexibles.

3.5.1.- Contenido de asfalto.

El contenido de cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla de resistir las deformaciones permanentes; debido a que este a su vez influye en la estabilidad de la mezcla, que depende de la cohesión proporcionada por el asfalto. La cohesión se incrementa con el aumento del contenido de asfalto, hasta un cierto punto conocido como óptimo, después del que cualquier incremento en el contenido de asfalto forma una película muy gruesa en las partículas de asfalto, lo que produce una pérdida de fricción entre las partículas de agregado. Los métodos Marshall y Hveem son los más comúnmente usados para determinar el contenido de asfalto de una mezcla.

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 ligante asfáltico. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.

Monosmith et al., (1988) recomendaron que la mezcla asfáltica debe tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Este criterio debe necesariamente estar asociado con mezclas de adecuada estabilidad debido al empleo de agregados de alta calidad.

3.5.2.- Tipo de asfalto.

La cohesión (c) puede considerarse la fracción de la resistencia al corte de la mezcla asfáltica provista por el cemento asfáltico. Debido a que las roderas son acumulaciones de muy pequeñas deformaciones permanentes, una forma de asegurar que el cemento asfáltico aporte una aceptable resistencia al corte es usar un asfalto no solo duro sino de comportamiento lo mas próximo posible a un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento (figura 3.7). Así, cuando una carga es aplicada

al cemento asfáltico en la mezcla, aquel tiende a actuar como una banda de goma y a recuperar su posición original en lugar de permanecer deformado.

Cuando los ligantes 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)

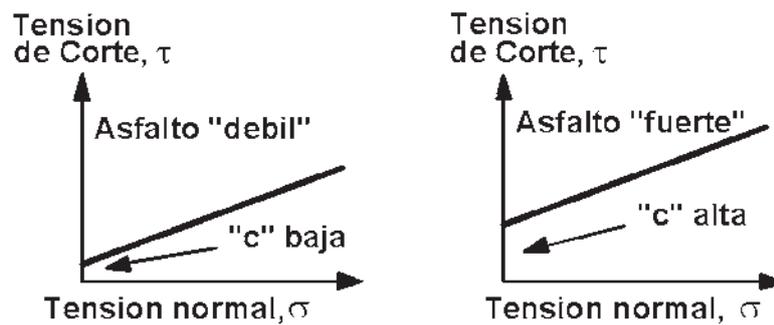


Figura 3.7 Contribución del asfalto a la resistencia de las roderas en una mezcla (Asphalt Institute, 1998).

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 ligante asfáltico que se le añada a la mezcla aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los ligantes 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 en comparación a la susceptibilidad que presentan los convencionales a las altas temperaturas, 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.

3.5.3.- Uso 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.

Stephens (1982) indicó que las mezclas asfálticas con contenido de caucho tienen una baja resistencia estática a la fluencia comparadas con las mezclas convencionales, y esta diferencia es más pronunciada para altas temperaturas de prueba. Stephens también encontró que las mezclas con caucho fino reciclado tienen mejor resistencia que las mezclas con cauchos granulares. Sin embargo, los resultados de las pruebas de fluencia dinámica indican que las mezclas modificadas tienen una mayor resistencia a la deformación plástica permanente que las mezclas convencionales. Estos estudios mostraron que bajo carga constante las mezclas modificadas se deforman más rápidamente que las mezclas convencionales, mientras que bajo carga repetida las mezclas modificadas se deforman menos que las convencionales.

Hanson et al. (1991) realizaron una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. Utilizando secciones de prueba, hicieron mediciones a lo largo de dos años para ver el comportamiento de las mezclas bajo deformación plástica permanente. En las pruebas de deformación plástica realizadas sobre corazones extraídos en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho. Sin embargo, las probetas preparadas en el laboratorio indicaron que no existe una diferencia entre las mezclas convencionales y las modificadas, estadísticamente hablando.

Kroutz y M. Stroup - Gardiner (1992) realizaron estudios con el fin de observar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado. Utilizando pruebas de carga estática y de carga repetida, analizaron la respuesta a la deformación permanente de dichas mezclas. Las conclusiones a las que llegaron indicaron que la adición del caucho reciclado genera mezclas que exhiben menos deformación permanente a altas temperaturas, comparadas con mezclas que no recibieron algún tipo de tratamiento.

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 ligantes 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 asfaltos 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.

Rebala y Estakhri (1995) observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las roderas. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría (vía seca) también se producen mezclas resistentes a la formación de roderas pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento. En el proceso de vía seca, el caucho existe como partículas separadas, dichas partículas en el asfalto normalmente intensificarán la propensión al agrietamiento pero podrán aumentar la resistencia a las roderas.

3.5.4.- 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.

Agregados de textura rugosa, de buena cubrición, dan mas resistencia que los redondeados y de textura lisa (figura 3.8). En el caso de que una partícula de agregado redondeado tuviera la misma resistencia interna que una partícula angular, las partículas angulares tienden a cerrarse mas apretadamente, resultando una fuerte masa de material.

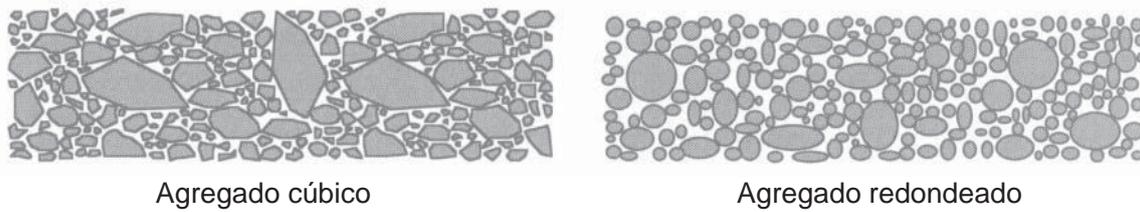


Figura 3.8 Diferencia entre el esqueleto de un agregado cubico y uno redondeado (Asphalt Institute, 1998).

Las partículas redondeadas, en lugar de trabarse, tienden a deslizarse unas sobre otras. Cuando una masa de agregado es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto de las otras (figura 3.9), lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. En este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de los agregados. La resistencia al corte de los agregados es crítica en la mezcla asfáltica.

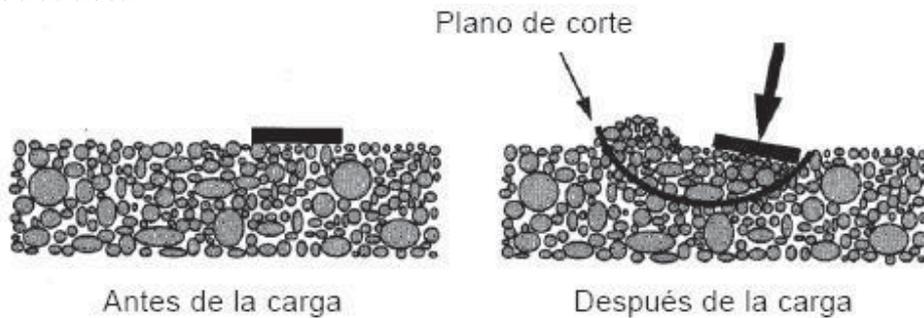


Figura 3.9 Comportamiento de los agregados a la carga de corte (Asphalt Institute, 1998).

El diferente comportamiento a la resistencia al corte de distintos agregados puede fácilmente observarse en las pilas de acopio, en las cuales los agregados triturados (predominantemente cúbicos) forman pilas más pronunciadas y estables que los redondeados. El ángulo de reposo de una pila de agregado triturado es mayor que el de una pila de material no triturado (figura 3.10).

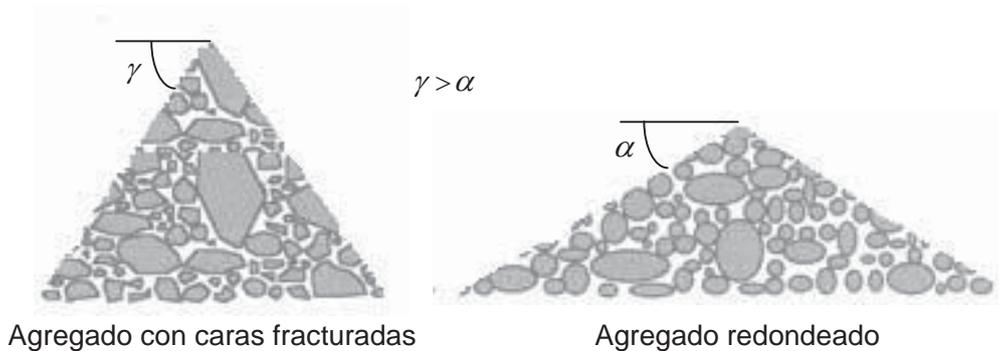


Figura 3.10 Comportamiento de las pilas de acopio (Asphalt Institute, 1998).

En lo relacionado al agregado la mejor forma de aumentar su resistencia al corte, en las mezclas asfálticas es eligiendo un agregado con un ángulo de fricción interno alto (ϕ). Esto se logra con la selección de un agregado de buena cubicidad y rugosidad, y con una granulometría tal que se logre un contacto partícula-partícula. En la figura 3.11 se compara la contribución de dos tipos de agregado a la resistencia al corte de la mezcla. Cuando una carga es aplicada al agregado en la mezcla, las partículas de este se juntan y funcionan no solo como una masa de partículas individuales sino como una enorme, única, roca elástica.

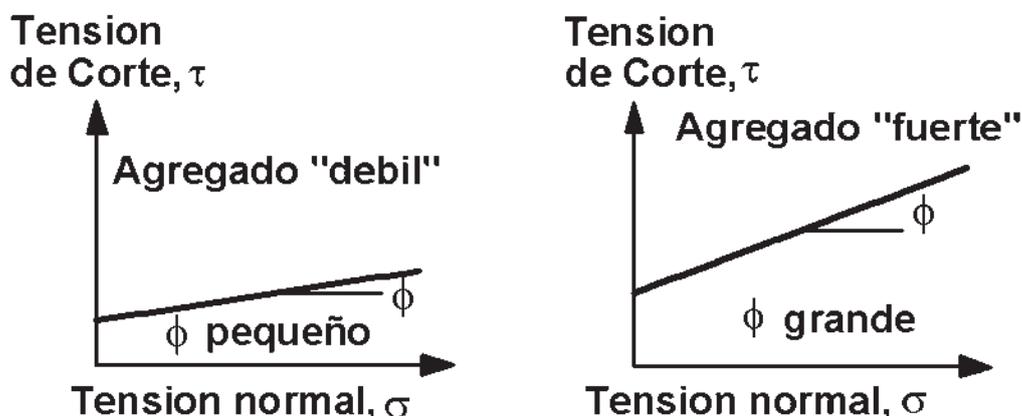


Figura 3.11 Contribución del agregado a la resistencia al corte en una mezcla (Asphalt Institute, 1998).

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.

Uge y Van de Loo (1974), usaron ensayos de laboratorio de deformación creep y encontraron que para las mismas curvas granulométricas, las estabildades mayores de las mezclas se lograron con agregados pétreos procedentes de trituración y las que menos estabilidad presentaron fueron las que tenían agregados con caras más redondeadas.

Una composición intermedia, la cual solo tiene la fracción de arena triturada, funciona o se comporta aún mejor que la que la formulación en la cual sólo el agregado grande fue triturado. Con esto se indica que el contacto entre partículas es más importante y significativo que el grado de trituración.

Cuando se aumentan las presiones de inflado de los neumáticos, las cargas axiales y las repeticiones de carga, se tiende a emplear mezclas asfálticas con piedras de mayor tamaño. Davis

(1988) aportó que los pavimentos asfálticos elaborados con asfaltos suaves, granulometrías con tamaños de piedra de 1.5 pulgadas o mayores, y bajo porcentaje de vacíos, presentan una importante resistencia a las deformaciones plásticas o roderas.

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.

3.5.5.- Granulometría del agregado pétreo.

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.

El método SUPERPAVE indica una granulometría específica para mezclas asfálticas, utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica, si bien esta granulometría no es de reciente invención por parte de los investigadores de SUPERPAVE, si le incluyeron ciertas mejoras como: la granulometría de máxima densidad, que representa el arreglo volumétrico mas compacto posible de las partículas de agregado; este arreglo deberá de evitarse porque quedaría muy poco espacio para permitir una película de asfalto demasiado gruesa para lograr una mezcla durable. Se adicionaron los puntos de control, que son puntos de paso obligados para la curva granulométrica. También se adicionó una zona restringida, que forma una banda que debe ser esquivada por la curva granulométrica, las granulometrías que invaden esta zona se les conoce como graduaciones con joroba e indican una graduación con mucha arena fina en relación al total de arena, lo que resulta en una mezcla de comportamiento débil y una deficiente resistencia a la deformación permanente en la vida de servicio.

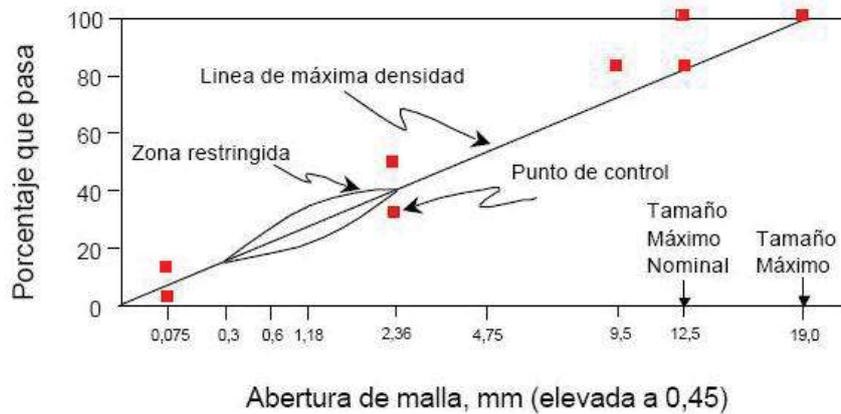


Figura 3.12 Límites granulométricos SUPERPAVE para una mezcla de 19 mm.

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.

Elliot et al. (1991) revisaron en su estudio el efecto de la variación de la granulometría en la generación de roderas de un pavimento asfáltico. Utilizaron información de pruebas de fluencia para examinar los efectos de la vida relativa en términos del desarrollo de las roderas. Para llevar a cabo comparaciones se tomó como base una mezcla de trabajo que consiste en material que pasa la malla No. 4 y se retiene en la No. 10 de ASTM. La mezcla está compuesta de 18% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina. Estos porcentajes se utilizaron también para los demás variaciones de granulometrías (fina, granular, fina-granular, y granular-fina).

Los resultados mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentaron profundidades de roderas de 7% a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y granular-fina, experimentaron profundidades de roderas de 13% a 19% mayores.

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%.

3.5.6.- Contenido de polvo mineral.

El polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mástico 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 mástico son diversos:

- ❖ 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.
- ❖ 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 riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. Puede ser el contenido en los agregados procedente de la trituración de los mismos, un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante procedente de central térmica o un polvo en general calizo especialmente preparado para este fin.

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 agregados más gruesos.
- ❖ Hace la mezcla más trabajable al envolver los agregados 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 agregado fino y, por supuesto, es de la misma naturaleza.

3.5.7.- Contenido de vacíos.

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.

Uge y Van de Loo (1974) encontraron que los desplazamientos relativos de las partículas minerales ocurren cuando la mezcla asfáltica es manejada a altas temperaturas (durante la extensión y compactación de la mezcla) o en moderada temperatura, pero también bajo cargas prolongadas sucede de la misma naturaleza. Por consiguiente para minimizar la propensión ante las roderas, ellos recomendaron el uso de mezclas ásperas (que afecta en cierto modo a la trabajabilidad) y rodillos pesados para su compactación. Dicha combinación da como resultado un esqueleto mineral muy estable y un incremento en la fricción interna. Concluyeron que las mezclas ásperas son enormemente resistentes a las deformaciones plásticas después de compactarlas cuando se ha colocado la capa.

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.

Linden y Van Der Heide (1987), enfatizaron la importancia de la compactación concluyeron que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad de las mezclas en el lugar, especialmente para diseños críticos (como por ejemplo un bajo contenido de asfalto pensado para aumentar la resistencia a las roderas). El buen diseño y producción de la mezcla aumenta la durabilidad y las propiedades mecánicas de las mezclas, sin dejar de lado su correcta compactación.

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 varios casos del 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.

3.5.8.- Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM).

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 ligante 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 y en el espesor de la capa de mezcla asfáltica causa 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.

3.5.9.- Carga por eje y presión de inflado del neumático.

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.

3.5.10.- 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.

3.5.11.- Temperatura ambiental.

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.

3.5.12.- 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 Oregón 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.

A continuación se presenta una tabla en la que se consideran de forma muy general la influencia de los elementos de una mezcla asfáltica y los ensayos que se le realizan, ante las deformaciones plásticas; además se considera el resultado que la mezcla presentaría si se modificara algún factor.

Tabla. 3.1 Factores actuantes en las deformaciones plásticas.

	Factor	Cambio del factor	Efecto sobre la resistencia al ahuellamiento
Agregado	Textura superficial	Lisa a rugosa	Incremento
	Granulometría	Discontinua a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
Ligante asfáltico	Modulo de rigidez	Incremento	Incremento
Mezcla asfáltica	Contenido del ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos en el agregado mineral	Incremento	Disminuye
	Método de compactación	Vibratorio o por amasado	Cambio en la estructura
Condiciones de ensayo	Temperatura	Incremento	Disminuye
	Estado y Nivel de tensiones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos o del nivel de tensiones	Disminuye
	Presencia de humedad	Seco a saturado	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

3.6.- Equipos para Medir las Deformaciones Plásticas.

Como se mencionó anteriormente, la deformación permanente en las mezclas asfálticas, es una combinación de la densificación, deformación por corte de las mismas bajo la acción de las cargas dinámicas provocadas por el tránsito, el clima, y puede ser estimado a través de distintas ecuaciones constitutivas que se alimentan por datos obtenidos de distintas líneas de trabajo que pueden complementarse entre sí como:

1. Ensayos de simulación a escala natural y/o equipamientos especiales sobre rutas reales (equipos simuladores de tránsito pesado) o tramos experimentales.
2. Ensayos de laboratorio y obtención de coeficientes de ajuste con respecto al comportamiento de la estructura real.
3. Análisis de datos de rutas reales, obtenidos del seguimiento periódico de tramos en servicio.

Los ensayos de laboratorio tienen la finalidad de tratar de reproducir al máximo posible, lo que ocurre en un pavimento en servicio cuando se le aplican las cargas, se pueden evaluar

deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y condiciones generales de los materiales y al final se puede obtener un dictamen con el que se puedan analizar las características y comparar con los requisitos o normas establecidas.

Estos ensayos ayudan a que los pavimentos puedan ser previamente analizados antes de su construcción, o bien después de su construcción, y existen unos ensayos más aproximados a la realidad que otros. A continuación se mencionarán superficialmente algunos de los tipos de ensayos que más se utilizan.

1. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial.
2. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial con carga pulsante.
3. Ensayo en compresión triaxial con carga dinámica.
4. Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga pulsante.
5. Ensayo de corte simple.
6. Ensayos de simulación.

Los primeros 5 son ensayos que nos permiten encontrar ecuaciones en función de los estados de tensión para distintas condiciones de servicio, y además tienen la ventaja de que son reproducibles en cualquier laboratorio, algunas de sus desventajas son que alguno de sus equipos son de elevado costo y de difícil operación en la ejecución de los ensayos, mientras que los ensayos de simulación, tienen la desventaja de que existen una gran variedad de diseños y no es factible comparar la magnitud de deformación entre ellos, aunque sus resultados permiten para un solo equipo establecer una clasificación de la deformación permanente de las distintas mezclas ensayadas. Tienen la desventaja de que no permiten predecir el ahuellamiento que se va a producir en la capa de concreto asfáltico a lo largo del tiempo, pero resultan más fáciles de operar que los anteriores además de que permite optimizar el diseño de la mezcla asfáltica.

3.6.1.- Ensayo de creep estático en compresión axial y triaxial.

Este ensayo ha sido muy utilizado para evaluar las características de las mezclas asfálticas y sus resultados fueron usados en varios métodos de predicción de la deformación plástica. Es uno de los ensayos mas ampliamente usados debido a su simplicidad, y sus resultados expresan la evolución de la deformación específica permanente en función del tiempo, para una carga aplicada y temperatura de ensayo.

Un grupo de investigadores liderado por Van de Loo, en los laboratorios de Shell en Ámsterdam, son los que más han usando esta práctica y es la que adopta el Método de Diseño de Pavimentos Flexibles de Shell.

La prueba consiste en someter a las probetas Marshall a un ensayo de compresión vertical con carga estática, sin confinamiento lateral, para condiciones previamente fijadas de carga y temperatura. Los resultados solamente permiten comparar el comportamiento de las mezclas ante la deformación acumulada, pero no se encontró un modelo para predecir el ahuellamiento.

3.6.2.- Ensayo de creep en compresión axial y triaxial con carga pulsante.

Utilizado para la medición de la respuesta de la mezcla asfáltica con carga repetida (con determinada frecuencia de tiempo). Existe una gran variedad de sistemas de carga, desde el tipo mecánico, neumáticos y hasta electro-hidráulicos. Los sistemas más sofisticados son capaces de:

- ❖ Aplicar cargas repetidas tanto axial como lateral, en fase una con otra, aplicando pulsos de carga de distintas formas, en un rango de 0.01 a 1 segundo de aplicación de carga
- ❖ Aplicar carga axial tanto en compresión como en tracción
- ❖ Incorporar periodos de descanso entre ciclos de sollicitación
- ❖ Medir la deformación permanente y resiliente horizontal y vertical
- ❖ Medir la temperatura con una tolerancia de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

Se puede decir que en general, los ensayos de carga repetida son más representativos y sensibles para la formulación de las mezclas asfálticas que los de carga estática.

3.6.3.- Ensayo en compresión triaxial con carga dinámica.

Estos ensayos aplican una carga sinusoidal en forma dinámica, para un rango de frecuencias. Permiten determinar sobre una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica, las propiedades dinámicas como de creep. Los ensayos triaxiales dinámicos, también permiten la determinación de propiedades fundamentales como los módulos dinámicos y el ángulo de fase en función de la frecuencia de la carga, el número de ciclos aplicados y la temperatura de ensayo. El ensayo ha sido ampliamente utilizado debido a que aplica un estado uniforme de tensiones sobre la probeta, admite la aplicación y combinación de un amplio rango de presiones de confinamiento y de tensores desviadores permitiendo reproducir gran parte de los estados de tensiones in situ, sus limitantes son para reproducir los estados de tensión de la capa de rodamiento, pero relativamente es fácil de utilizar.

3.6.4.- Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga pulsante

Es un ensayo que ha alcanzado un gran desarrollo al nivel de la técnica vial mundial. El ensayo estaba destinado originalmente a la tracción del concreto hidráulico, pero fue adoptado para la determinación de modulo de deformación y resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.

Las razones por la que se implementó esta aplicación son:

- ❖ Es sencillo de efectuar y de fácil implementación.
- ❖ Las probetas requeridas son comunes a las de otros ensayos (Marshall), pudiendo utilizarse tanto en muestras obtenidas de un camino o elaboradas en el laboratorio.
- ❖ Posee buena repetitividad con bajo coeficiente de variación de sus resultados
- ❖ Pueden realizarse ensayos con cargas repetidas o con carga estática.

Si bien es una herramienta útil para la obtención de módulos y vida fatiga de mezclas asfálticas, no sería apropiada para la caracterización a deformación permanente, principalmente cuando la temperatura o carga de ensayo produce deformaciones importantes sobre la probeta. Este hecho hace que las tensiones actuantes no sean constantes y por lo tanto se dificulta relacionar una deformación permanente con un nivel de tensiones dado.

3.6.5.- Ensayo de corte simple

Este ensayo ha sido muy empleado en Mecánica de Suelos, para la determinación de las propiedades al corte de los suelos. Para mezclas asfálticas su uso se justifica cuando la causa predominante del ahuellamiento es la fluencia plástica de corte. El equipo más apropiado es el que permite cargas repetidas o dinámicas sobre un rango de frecuencias que permitan además la determinación de módulos de corte resiliente y dinámico.

Si bien es hasta el momento poco el uso de esta técnica de ensayo, es aplicable para establecer las propiedades de las mezclas asfálticas al ahuellamiento, ya que es provocado principalmente por la fluencia plástica por corte.

Monishmith y otros investigadores han utilizado esta técnica para comparar la respuesta del comportamiento de las mezclas asfálticas compactadas por amasado.

4.6.6.- Ensayos de Simulación.

Aparece como muy razonable su utilización en el campo de la predicción de las deformaciones plásticas, sus resultados son muy aproximados con el funcionamiento real del pavimento. Simulan muy bien lo que sucede realmente en un pavimento sometido a las cargas del tráfico. Existe suficiente información disponible para dar recomendaciones y adoptar criterios. Son los tipos de ensayos que más rápidamente se adoptaron para realizar este tipo de análisis.

Para alcanzar una validez correcta entre lo que sucede en el laboratorio y en el campo, el ensayo debe de reproducir la condiciones de tensiones que se desarrollan dentro de un 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, mediante una rueda cargada.



Capítulo 4.

Estudio Reológico.

4.1.- Antecedentes.

Durante los últimos años el estilo de vida de las personas ha cambiado de una manera notable y los materiales que antes proporcionaban un comportamiento satisfactorio resultan insuficientes para suplir los nuevos requerimientos.

Es por esta demanda de materiales más resistentes y con una mayor vida útil, que actualmente se trabaja en la modificación y refuerzo de las materias primas convencionales para obtener otras nuevas y mejores. El asfalto por su parte no es una excepción a este hecho, por esto, actualmente se desarrollan numerosos trabajos de investigación que estudian su comportamiento una vez que han sido modificados.

Proyectos de esta naturaleza se han venido desarrollando en países líderes en la modificación de asfaltos como Estados Unidos (Becker, Mendez, Rodriguez, 2001), lugar donde en los años 80's se llevó a cabo una compilación de las normas y especificaciones técnicas existentes orientadas al mejoramiento de las vías de alto tráfico por medio de la comprensión de la química y física de los asfaltos, permitiendo con esto una evaluación consistente para todos los materiales. De esta manera surgen los parámetros estándares de calidad SHRP (Strategic Highway Research Program) los cuales son utilizados actualmente para la evaluación de las vías (Asphalt Institute, 1998).

Cuando se habla de la modificación del asfalto se hace referencia a la incorporación controlada de otro material el cual permita mejorar su desempeño. Los agentes modificadores que se pueden utilizar cubren una amplia gama de materiales tales como cargas minerales, polímeros, látex, resinas, caucho y vidrio, entre otros (Becker, Mendez, Rodriguez, 2001).

Al llevar a cabo la incorporación del modificador se forman estructuras internas de refuerzo a manera de un panal de abeja constituidas por el material adicionado (Takamura K. 2002). Estas redes establecen estructuras que le brindan al material una mayor resistencia térmica, menor susceptibilidad ante procesos de envejecimiento y un aumento de la componente elástica del material. Es debido a esta sinérgia que los asfaltos modificados presentan propiedades mecánicas y reológicas superiores a los que no han sido modificados.

Es común encontrar fallas de diversa índole en los pavimentos asfálticos, causadas por diferentes factores, todos hacen parte de la puesta en servicio de una vía. Sin embargo, es la inadecuada respuesta de la estructura y de la carpeta o el propio uso de la vía la que genera diversos tipos de falla, como el ahuellamiento, la fisuración, el desgranamiento, etc. La respuesta del pavimento y sus deterioros se deben principalmente a su comportamiento frente a los factores por los que se ve afectado.

Bajo la óptica de la mecánica de los materiales, una mezcla asfáltica presenta un comportamiento elásto-plástico, el cual es predecible y controlable, siempre y cuando se tomen las consideraciones necesarias desde la etapa de diseño.

4.2.- Métodos de Caracterización Reológicos.

El empleo de asfaltos modificados con polímeros de las más diversas variedades y procedencias es una de las tendencias más importantes de la industria actual de construcción de carreteras.

Los beneficios que proveen los polímeros a las características de los asfaltos están siendo extensamente estudiados. Sin embargo, actualmente es común que continuamente se presenten en el mercado nuevos productos; es por esto, fundamental realizar un análisis exhaustivo de las mejoras que aportaría dicho polímero al asfalto.

La metodología de clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG), introducida por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP), se ha consolidado como una herramienta muy utilizada para el análisis de asfaltos. Sin embargo, en el caso de asfaltos modificados su rango de aplicación es muy limitado. El principal problema, como se pretende demostrar en este trabajo, es que asfaltos modificados con distintos modificadores se pueden clasificar con el mismo grado de desempeño, sin poder distinguir entre los aportes individuales de

cada modificador, diferencias que evidentemente existen y que deberían de verse reflejadas en el sistema de clasificación.

Actualmente, se han implementado diferentes propuestas en estudios a nivel mundial para la caracterización de asfaltos; las cuales pueden ponderar cuál, de varios modificadores provoca mejores condiciones reológicas al asfalto. En este estudio se han analizado las diferentes metodologías propuestas para el análisis de las características reológicas del asfalto relativas al desempeño de los mismos ante las deformaciones permanentes.

4.2.1.- SUPERPAVE.

En 1987, el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) comenzó el desarrollo de nuevos ensayos para medir las propiedades de los asfaltos. Un resultado de este esfuerzo es una nueva especificación para ligantes, que se desarrolló en base a una gran cantidad de ensayos sobre asfaltos convencionales (no modificados).

La singularidad de este sistema consiste en que es una especificación basada en el desempeño (performance) del asfalto. Clasifica los ligantes en base al clima y a la temperatura prevista en el pavimento. El grado de desempeño (PG) de un ligante tiene la siguiente nomenclatura PG XX-YY. El primer valor XX, es normalmente llamado "grado de alta temperatura"; lo que significa que el ligante posee propiedades físicas para trabajar adecuadamente hasta esa temperatura. El segundo valor YY es llamado "grado de baja temperatura"; y significa que el ligante posee propiedades físicas adecuadas para trabajar adecuadamente hasta esa temperatura. El sistema se fundamenta en las propiedades reológicas del ligante asfáltico en sus diferentes etapas de envejecimiento (almacenamiento, mezclado, colocación y envejecimiento a largo plazo). Se basa principalmente en la determinación del módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) del ligante asfáltico mediante la utilización de un Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

Los ensayos SUPERPAVE en laboratorio miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra.

Tabla. 4.1 Equipos empleados por SUPERPAVE.

Procedimiento	Objetivo
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	Medir las propiedades a temperaturas altas e intermedias.
Viscosímetro Rotativo (VR)	Medir propiedades a altas temperaturas.
Reómetro de Viga a Flexión (BBR) Ensayo de Tracción Directa (DDT)	Medir propiedades a bajas temperaturas.
Horno Rotativo de Película Delgada (RTFO)	Simular el endurecimiento durante la etapa constructiva.
Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV)	Simular el envejecimiento durante la vida útil.

- Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

Debido a que el comportamiento del asfalto depende tanto del tiempo como de la temperatura, el ensayo ideal para los asfaltos debe evaluar ambas propiedades. El equipo que se propuso para esta tarea se conoce como Reómetro de Corte Dinámico, Reómetro Oscilatorio de Corte o Reómetro Dinámico. Adaptando estos equipos para su uso en asfalto, los efectos del tiempo y la temperatura pueden ser evaluados; cuando se usan en la evaluación de ligantes asfálticos los DSR, miden las propiedades reológicas (módulo de corte complejo, ángulo de fase, etc.) a temperaturas altas e intermedias.



Figura. 4.1. Diferentes modelos de Reómetro de Corte Dinámico.

El Reómetro de Corte Dinámico (DSR) es usado para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los ligantes asfálticos. Para ello se mide el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) del ligante. G^* es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se somete repetitivamente al corte. El mismo tiene dos componentes: una elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable). δ es un indicador de las proporciones de las deformaciones recuperable y no recuperable. Los valores de G^* y δ en los asfaltos dependen en gran medida de la temperatura y frecuencia de la carga.

La operación del DSR es sencilla, el asfalto se comprime entre dos placas paralelas; una fija y la otra oscilante hacia adelante y hacia atrás (figura 4.2). La placa oscilante, parte del punto A y se mueve hacia el B. Desde el punto B, la placa oscilante retrocede y pasa por el punto A en su recorrido hacia el C y luego la placa vuelve al punto A. Este movimiento, de A a B y a C y vuelta a A se define como un ciclo (figura 4.2).

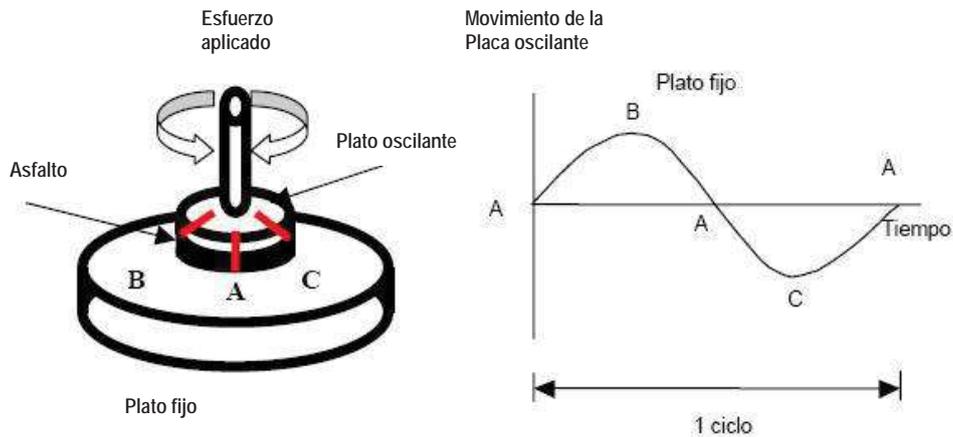


Figura 4.2 Esquema del funcionamiento del Reómetro de Corte Dinámico.

A altas temperaturas, el asfalto se comporta como un fluido viscoso sin capacidad de recuperación elástica para volver a su posición original después de la aplicación de un esfuerzo. En esta condición, el asfalto podría ser representado por el eje vertical (solo componente viscoso). No podría haber componente elástico de G^* para $\delta = 90^\circ$. A muy bajas temperaturas, los asfaltos se comportan como un sólido elástico, el cual regresa a su estado original después de deformarse completamente. Esta condición se representa por el eje horizontal (solo componente elástico). En este caso, no existe componente viscoso de G^* para $\delta = 0^\circ$ (figura 4. 3).

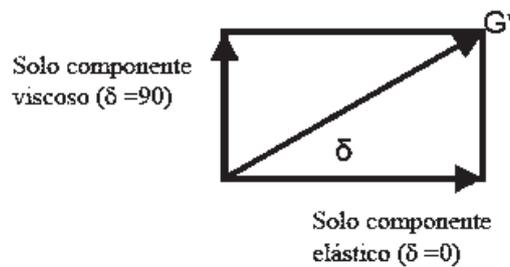


Figura 4.3 Comportamiento a diferentes temperaturas.

Si el material es elástico la respuesta de la deformación estará en fase con respecto al esfuerzo (figura 4.4.a), pero si el material es viscoso entonces la respuesta estará fuera de fase 90° (figura 4. 4.b)

La metodología SUPERPAVE toma las propiedades físicas en forma constante para todos los grados de desempeño (PG). Sin embargo, la temperatura a la cual se debe de cumplir esta propiedad varía dependiendo del clima del lugar en donde se va a emplear el ligante asfáltico.

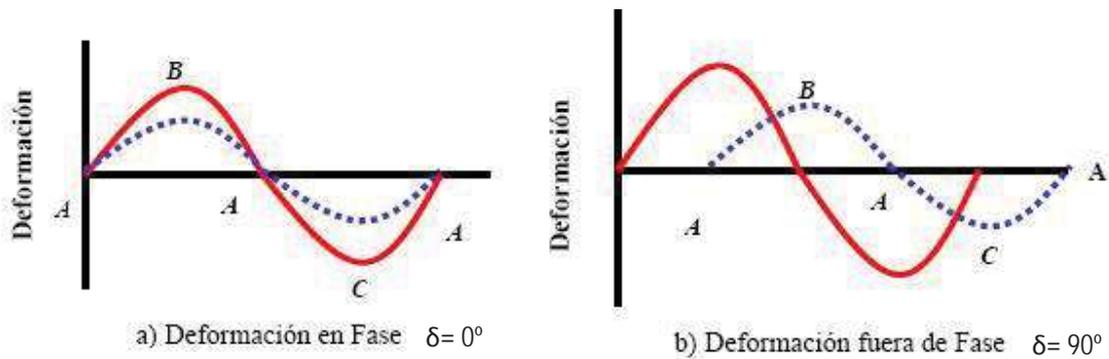


Figura 4.4 Tipos de deformación.

- Viscosímetro Rotacional (VR).

Una de las finalidades del ensayo rotativo de viscosidad se especifica para determinar características de flujo del asfalto a las elevadas temperaturas empleadas en el proceso de bombeo en la refinería, terminales y plantas de mezclado en caliente. Un viscosímetro de cilindro rotacional coaxial, como el especificado por ASTM D4402, Viscosímetro Brookfield (figura 4.2.5) es necesario para ensayar los distintos tipos de asfalto a evaluar. A diferencia de los viscosímetros de tubo capilar, los aparatos rotativos son adecuados para una amplia variedad de asfaltos modificados y sin modificar.

El viscosímetro rotatorio está conectado a un control digital que calcula automáticamente la viscosidad a la temperatura de ensayo. El viscosímetro también puede ser empleado para desarrollar las curvas viscosidad-temperatura empleadas para estimar las temperaturas de mezclado y compactación usadas en el diseño de mezclas. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa.s respectivamente.



Figura 4.5 Viscosímetro rotacional.

- Horno Rotativo de Película Delgada (RTFO).

Este ensayo fue desarrollado por el Departamento de Carreteras de California para simular el envejecimiento en las plantas durante la elaboración de las mezclas de concreto asfáltico en caliente. El RTFO es usado por su repetibilidad y porque expone continuamente el ligante al calor y flujo de aire. Su acción rotatoria mantiene en algunos casos los modificadores (como polímeros) dispersos en el asfalto. Otra ventaja del RTFO es que el envejecimiento del asfalto se logra tan solo en 85 minutos.

Este ensayo cubre dos propósitos. Uno es producir un asfalto oxidado que pueda emplearse para ensayos adicionales (DSR y material base para PAV). El otro es determinar la cantidad de volátiles que pierde el asfalto durante el ensayo. Esta cantidad perdida es indicadora del envejecimiento que puede ocurrir durante la proceso de mezclado y construcción.



Figura 4.6 Horno Rotativo de Película Delgada.

- Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV).

El equipo PAV usa presión y temperatura para reducir el tiempo de ensayo; así un largo periodo de envejecimiento en largos periodos de servicio puede ser simulado en sólo 20 horas. Los ligantes asfálticos, después del envejecimiento en el RTFO, son colocados en el PAV y envejecidos por 20 horas. Las propiedades físicas son medidas, como se indicó antes, para determinar si el asfalto se comportará adecuadamente luego de varios años de servicio. El ensayo se realiza a distintas temperaturas dependiendo del clima en el que el pavimento será construido.



Figura 4.7 Cámara de Envejecimiento a Presión.

Parámetros de Ensayo.

- *Deformación Permanente.*

Las deformaciones plásticas en los pavimentos asfálticos son causadas por la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por la acción del tránsito. En cada periodo de carga se presenta una sollicitación que deforma la estructura del pavimento. Una parte de la deformación causada en cada ciclo de carga se recupera debido a la elasticidad de los materiales y otra parte de la energía aplicada es disipada en forma de calor y de flujo causando la deformación permanente o no recuperable.

Para reducir la formación de deformaciones plásticas debe disminuirse la energía disipada en cada ciclo de carga. A altas temperaturas de trabajo el asfalto se comporta como un material viscoelástico; este fenómeno puede considerarse como controlado por el esfuerzo y por la aplicación de cargas cíclicas. La energía disipada en cada ciclo de carga es inversamente proporcional al parámetro $G^*/\text{sen } \delta$.

Este parámetro combina la resistencia total del material ante la deformación G^* y la relativa no-elasticidad del material reflejada por $\text{sen } \delta$.

En la ecuación $\text{sen } \delta = G''/G^*$, en donde G'' representa el módulo de pérdida o el módulo viscoso y se encuentra relacionada con la capacidad del material de disipar energía en cada ciclo de carga, su relación con G^* da una medición relativa de la componente no-elástica de la resistencia total a la deformación. Esto nos indica que la resistencia a la deformación permanente de un ligante se puede aumentar al incrementar el valor del módulo complejo G^* o al disminuir la parte no elástica $\text{sen } \delta$. G^* y δ son función de la temperatura y del tiempo de carga, debido a esto se miden a la temperatura

máxima de diseño y a la frecuencia de 10 rad/seg que se asemeja al efecto producido sobre la carpeta por un vehículo moviéndose entre 80 y 90 km/hr.

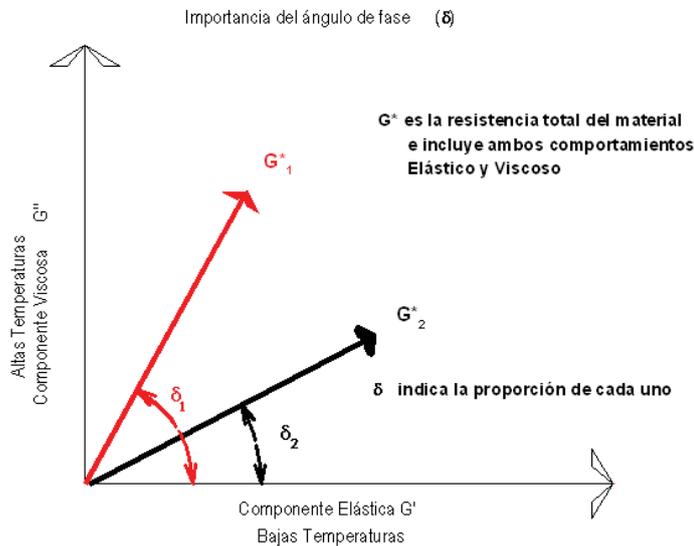


Figura. 4.8 Importancia del ángulo de fase δ (fuente: Sandoval, 2007).

En general, para todos los asfaltos vírgenes y para la mayoría de los modificados, la oxidación causada por la producción de la mezcla asfáltica en caliente, se traduce en un aumento del módulo complejo G^* y en una disminución del ángulo de fase δ . Esta se ve reflejada en una mayor resistencia a la deformación y mayor elasticidad, lo que significa un aumento en la formación de roderas. Dicho esto podemos deducir que las propiedades iniciales del asfalto en el pavimento son más críticas, desde el punto de vista de las deformaciones permanentes, que las del asfalto envejecido, es por esto que SUPERPAVE especifica un límite mínimo para el valor de $G^*/\text{sen } \delta$ en el asfalto original y en el asfalto envejecido en el ensayo RTFO.

La especificación de SUPERPAVE establece un requerimiento mediante la utilización de un factor de deformación, $G^*/\text{sen } \delta$, el cual representa una medida de la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas o la resistencia a la deformación del ligante asfáltico. El factor se denomina G^* asterisco entre seno de delta y es determinado dividiendo el módulo complejo de corte (G^*) entre el seno del ángulo de fase (δ). $G^*/\text{sen } \delta$ debe ser como mínimo 1.00 kpa para ligante asfáltico original (sin envejecimiento) y 2.20 kpa como mínimo para el residuo del RTFO.

A pesar de que el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ clasifica adecuadamente el desempeño de los asfaltos vírgenes ante la deformación permanente se ha demostrado mediante diversos estudios como los realizados en el ALF (Accelerated Loading Facility) del Turner Fairbank Highway Research Center (Shenoy A. 2001), que este parámetro no clasifica de forma eficiente algunos asfaltos, especialmente los modificados.

Algunas de las causas de este defecto son: 1) que el desarrollo de SUPERPAVE se realizó con asfaltos vírgenes y 2) el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ presenta poca sensibilidad a los cambios en el ángulo de fase (δ). Esta deficiencia en la clasificación de los asfaltos puede llevarnos a una mala elección de un ligante para determinadas condiciones de trabajo del pavimento en servicio.

La poca sensibilidad ante los cambios de ángulo de fase (δ) de $G^*/\text{sen } \delta$ implica la posibilidad de que se clasifiquen con un mismo PG (Performance Grade) asfaltos que presenten comportamientos muy diferentes ante la deformación permanente. (Sandoval, 2007) explica este concepto mediante el análisis de dos asfaltos modificados, uno con un elastómero y el otro con un plastómero; de donde concluye que:

El parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ determina que el asfalto modificado con un plastómero presenta un desempeño igual ante la deformación permanente que el asfalto modificado con un elastómero, sin embargo tomando en cuenta los valores de Ángulo de fase, Recuperación Elástica por Torsión y Recuperación Elástica por Ductilómetro es claro que el asfalto con elastómero tiene mayor capacidad elástica que el asfalto modificado con plastómero.

4.2.2.- SUPERPAVE Refinado.

Debido a la importancia de contar con un método o un parámetro que clasifique adecuadamente todos los tipos de asfaltos en especial los modificados, especialistas de varios países se han dado a la tarea de realizar estudios e investigaciones, una de las tendencias es la de modificar los parámetros existentes, para lograr remediar las fallas que presentan los parámetros originales.

Al realizar pruebas de Recuperación en Creep Repetido (RCRB), al aplicar una fuerza σ_0 (kpa) durante t (seg), la deformación total o deformación máxima ϵ_{max} debe ser la suma de la deformación elástica más la deformación viscosa o no recuperable.

$$\% \epsilon_{\text{max}} = \% \epsilon_{\text{rec}} + \% \epsilon_{\text{no rec}} \quad (1)$$

$$\% \epsilon_{\text{max}} = 100 \frac{\sigma_0}{G^*} \quad (2)$$

$$\frac{\% \epsilon_{\text{rec}}}{100 \sigma_0} = \frac{G'}{G^*} \quad (3)$$

Cuando se le otorga suficiente tiempo para que la muestra se recupere totalmente. Bajo esta condición, y teniendo presente que $G' = G^* \text{sen } \delta$ (módulo viscoso) y $G'' = G^* \text{cos } \delta$ (módulo elástico), si sustituimos podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\frac{\% \epsilon_{\text{no rec}}}{\% \epsilon_{\text{max}}} = 1 - \frac{1}{\tan \delta \text{sen } \delta} \quad (4)$$

En esta ecuación resulta un valor de 1 cuando $\delta = 90^\circ$ lo que nos indica que se trata de un material viscoso. Por otro lado, se ha comprobado que los resultados de la ecuación se vuelven inconsistentes para valores de $\delta < 52^\circ$. Sin embargo, debido a que generalmente las pruebas se realizan a temperaturas relativamente altas, no es común obtener ángulos de fase (δ) menores de 52° , aunque se han presentado algunos casos. Si sustituimos (2) en (4).

$$\% \epsilon_{no\ rec} = \frac{100\sigma_0}{G^*} \left(1 - \frac{1}{\tan \delta \text{ sen } \delta} \right) \quad (5)$$

Ya que G^* y δ son función de la frecuencia y la temperatura, el efecto de la velocidad del tránsito y de la temperatura del pavimento, están integrados en esta ecuación. La deformación permanente se puede expresar como:

$$\% \epsilon_{no\ rec} = 100\sigma_0 / \frac{G^*}{1 - \left(\frac{1}{\tan \delta \text{ sen } \delta} \right)^{(6)}}$$

Para poder minimizar la deformación permanente se debe de maximizar el término: $\frac{G^*}{1 - \left(\frac{1}{\tan \delta \text{ sen } \delta} \right)}$

Los valores de 1.0 kpa para asfaltos originales y de 2.2 para asfaltos envejecidos permanecen iguales. Para los asfaltos originales el grado de desempeño obtenido con parámetro actual y el anterior coinciden, mientras que para los asfaltos modificados los resultados difieren, permitiendo así una mejor clasificación de estos, debido a que el parámetro es más sensible a la variación en el ángulo de fase y permite una descripción con mayor precisión de la deformación no recuperable de los asfaltos. Gracias a este parámetro se han podido distinguir asfaltos con diferente comportamiento frente a la deformación permanente.

El parámetro PGB (Performance Grade Based) ha sido efecto de diversas comparaciones con resultados experimentales, presentando buenas correlaciones con estos; que permiten diferenciar entre varios asfaltos modificados con igual grado PG.

Es importante recalcar que este parámetro no es válido para ángulos de fase (δ) menores o iguales de 52° , en el caso de que se presentara este comportamiento como puede ser con algunos modificadores o con asfaltos oxidados, es necesario emplear la ecuación:

$$\frac{G^*}{(\text{sen } \delta)^P}$$

Donde $P=9$, aunque puede tomar otro valor de encontrarse una buena correlación.

Este parámetro puede llegar a ser considerado como una especificación para las mezclas asfálticas, en donde, a través de este se puede evaluar el potencial ahuellamiento.

4.2.3.- Viscosidad a Corte Cero (ZSV).

La viscosidad a corte cero es la viscosidad medida a velocidades de corte extremadamente bajas, velocidades cercanas a cero. Al aplicar un esfuerzo a un material a velocidades tan bajas la energía se va disipando entre cada una de las capas del material (figura 4.9), hasta que llega el momento en que la cantidad de energía disipada es constante y la resistencia al flujo que ofrece la estructura del material se vuelve constante, por lo que la viscosidad de corte no cambia y se hace independiente de la velocidad de corte.

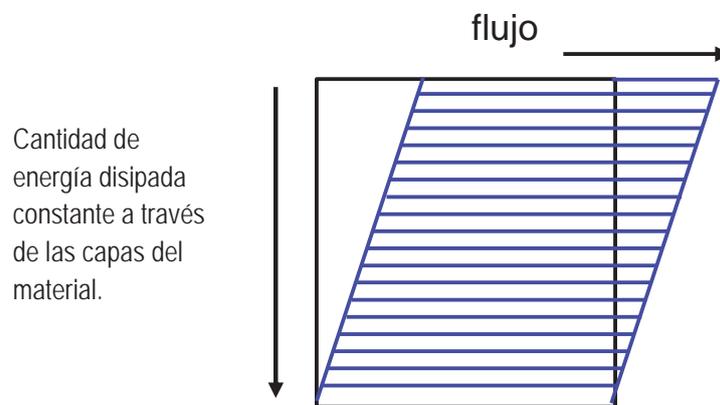


Figura 4.9 Energía disipada en capas de material (fuente: Sandoval, 2007).

Cuando se aplica una fuerza a velocidades altas, la energía actúa sobre las primeras capas del material sin que este tenga la capacidad de disipar la energía entre ellas por lo que se vencen las energías intermoleculares, como pueden ser fuerzas de Van Der Waals o puentes de hidrógeno. Al vencer estas energías intermoleculares se afecta la estructura del material y por lo tanto ofrece menor resistencia al flujo.

El uso del Zero Shear Viscosity (ZSV) como parámetro de especificación es una evaluación mucho más fundamental que $G^*/\sin \delta$ puesto que evalúa el desempeño de los ligantes modificados con mayor precisión. ZSV muestra que para ligantes modificados con elastómeros, el grado del ligante puede ser aumentado hasta dos grados en comparación con otros ligantes.

- Metodología empleada para calcular el parámetro ZSV.

En este estudio, para calcular el valor de especificación ZSV que deben cumplir los ligantes asfálticos, se plantea el siguiente proceso el cual lo dividiremos en dos etapas:

Como primera etapa se debe determinar el grado de desempeño PG de los asfaltos, para posteriormente obtener la temperatura de falla (T_F), esta es la temperatura a la cual $G^*/\sin \delta$ tiene el valor de 1.0 kpa para asfaltos vírgenes y de 2.2 para asfaltos envejecidos mediante el ensayo RTFO. Para el cálculo de estos dos valores se utiliza el Reómetro de Corte Dinámico bajo las condiciones de prueba normalmente empleadas por el software SHRP.

En la segunda etapa se determina en el DSR mediante barridos de frecuencia, el valor de Viscosidad de Corte Cero de los asfaltos a la temperatura de falla (T_F). Para calcular el valor de ZSV a la T_F se debe de seguir el siguiente proceso:

- **Barridos de deformación:** se realizan barridos de deformación entre 0.1 y 10 % en el DSR, en un rango de temperaturas de aproximadamente 30° C alrededor de la T_F , con la información obtenida mediante el proceso anterior se determina la zona de respuesta lineal viscoelástica, de dicha zona se obtiene el esfuerzo a emplear en los barridos de frecuencia. Con esto se esta garantizando no afectar la estructura del asfalto durante el análisis dinámico en el DSR.

- **Barridos de frecuencia:** se realizan barridos de frecuencia entre 0.1 y 100 rad/seg (en algunos casos es necesario emplear frecuencias entre 0.01 y 100 rad/seg). Se aplica el mismo esfuerzo empleado para calcular el grado de desempeño y la temperatura de falla, debido a que este nivel de esfuerzo se encuentra dentro de la zona de respuesta lineal viscoelástica. Los barridos de frecuencia, se realizan al igual que los barridos de deformación, en un rango de temperaturas de aproximadamente 30° C alrededor de la temperatura de falla.

Posteriormente se determina el valor de la Viscosidad a Corte Cero a cada una de las temperaturas de análisis. Con estos valores de Viscosidad a Corte Cero (η_0), se realiza una curva de comportamiento de $\text{Log}(\eta_0)$ contra temperatura, y finalmente de esta curva se determina el valor de Viscosidad de Corte Cero a la temperatura de falla.

Se determinó un valor mínimo de $\text{Log}(\eta_0) = 2.39$ para asfalto envejecido, este valor se toma como especificación que deben de cumplir los asfaltos.

El valor de $\text{Log}(\eta_0) = 2.39$ es el que los Cementos Asfálticos deben de cumplir como especificación para estimar la resistencia ante la deformación permanente. La temperatura a la cual un ligante asfáltico presenta este valor de Viscosidad de Corte Cero será la temperatura máxima de trabajo del asfalto, en un pavimento asfáltico. El grado de desempeño será aquel anterior a la temperatura mencionada, y es valido para asfaltos normales y modificados; como se puede relacionar con lo dicho anteriormente las exigencias no cambian lo que cambia es el parámetro para medir el desempeño.

La Viscosidad de corte cero es uno de los principales candidatos para convertirse en el parámetro de especificación vigente en Europa (Binard, Anderson, Lapalu, Planche, 2005).

A continuación se presentan las curvas $\text{Log}(\eta_0)$ vs temperatura de cuatro asfaltos provenientes de diferentes orígenes, obtenidas con la metodología anteriormente descrita (Sandoval, 2007).

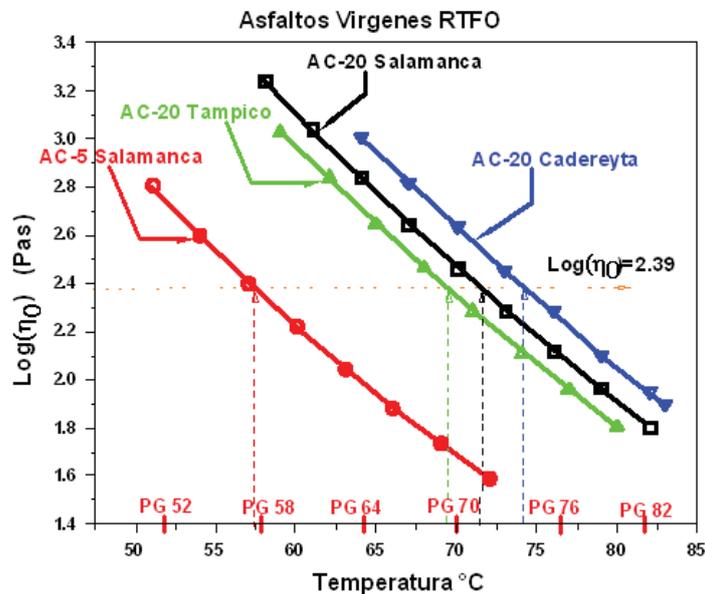


Figura 4.10 Valor de la especificación de Viscosidad de Corte Cero (fuente: Sandoval, 2007).

4.2.4.- Creep Repetido.

Con el propósito de encontrar un parámetro que describiera el papel de los ligantes en la deformación permanente de la mezcla con una mayor efectividad que $G^*/\text{sen } \delta$ se planteó lo siguiente:

1. Las deformaciones que experimentan los ligantes en un pavimento son mucho mayores que las deformaciones a que se someten los ligantes en el Reómetro Dinámico de Corte (DSR).
2. La carga cíclica con una completa reversión de esfuerzo o deformación no es adecuada para calcular la contribución del ligante a la resistencia a la deformación plástica ocasionada por cargas cíclicas irreversibles (conocida como deformación cíclica no reversible o creep repetido).

La primera hipótesis se debe a que estudios previos han indicado que los ligantes modificados varían significativamente en su dependencia a la deformación. Además se ha demostrado que el comportamiento reológico de la mezcla es muy susceptible al nivel de deformación. La segunda hipótesis se relaciona con el concepto de disipación de energía.

Se ha demostrado que a altas temperaturas (70° C), los ligantes asfálticos son muy sensibles a la deformación únicamente para niveles de deformación muy altos (exceden el rango razonable de 50 %). Debido a esto, se concluyó que la sensibilidad a la deformación no puede ser utilizada para explicar los resultados de los ensayos de deformación permanente. Como se muestra en la figura 4.11, durante la carga cíclica reversible, en donde únicamente la energía total disipada puede ser estimada.

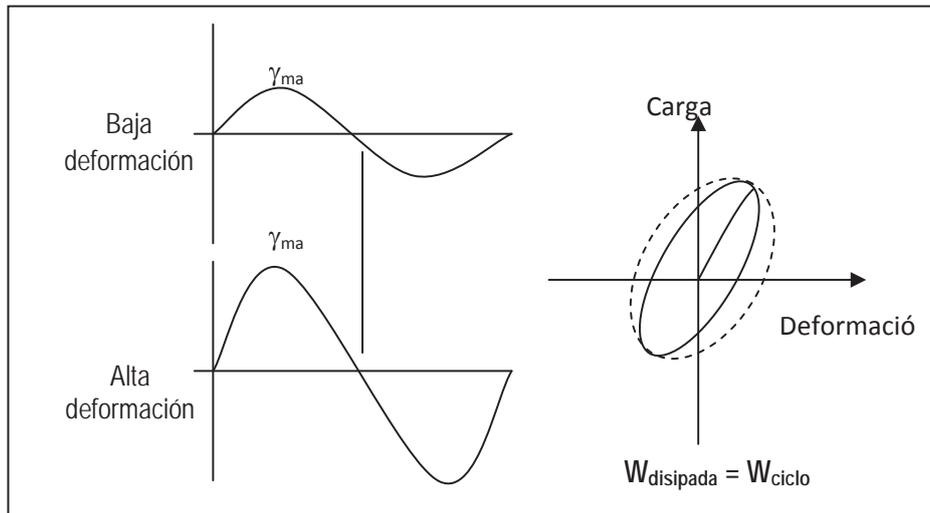


Figura. 4.11 Concepto utilizado para la derivación de $G^*/\text{sen } \delta$ (fuente: Loria, 2007).

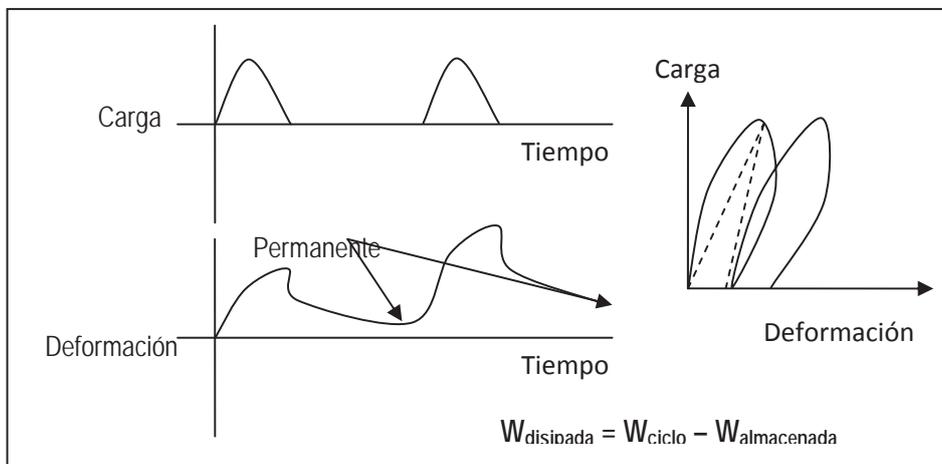


Figura. 4.12 Concepto mejorado de energía disipada (fuente: Loria, 2007).

El mecanismo de deformación, tal y como ocurre en campo, no incluye cargas del tipo reversible que lleven el material del pavimento a una deformación de cero. Como se muestra en la figura 4.12, la deformación es en realidad un mecanismo de creep repetido con pulsos de carga sinusoidal. En este caso, la capa del pavimento asfáltico no es forzada a una deflexión de cero, pero se recupera de alguna deformación debido a una energía elástica almacenada en el material constituyente de la

capa. Bajo este tipo de carga, la energía es disipada en amortiguación (también llamado viscoelasticidad o histéresis) y en flujo permanente. En el primer caso de la energía de amortiguamiento es en su mayor caso recuperable, pero requiere de tiempo para ser utilizada efectivamente. En el segundo caso la energía relacionada con el flujo permanente se pierde. Se cree que la parte permanente de la energía disipada es el mayor contribuyente de la resistencia a la deformación permanente de mezclas y pavimentos asfálticos. Uno de los principales problemas de los métodos de carga cíclica reversible utilizados actualmente es el de la incapacidad de distinguir entre estos dos mecanismos que resultan en la disipación de energía.

Por esta razón se inició un proceso de ensayo de creep repetido con el DSR. De los resultados se ha observado una clara distinción entre la deformación permanente acumulada de los ligantes, la cual no pudo ser identificada usando el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$.

También, se da una inversión en el ranking de los parámetros, pues hay una capacidad de los ligantes de recuperarse bajo las condiciones de carga. Esta recuperación, sin embargo, no es detectada por $G^*/\text{sen } \delta$ debido a que el parámetro no puede distinguir entre la energía total disipada y la energía disipada por flujo permanente.

La prueba de CREEP-RECOVERY (RCRT, Repited Creep-Recovery Test) consiste en aplicar a un material un esfuerzo determinado, causando con esto una deformación (creep), después de un periodo determinado en el cual se mantuvo el esfuerzo constante, se retira totalmente el esfuerzo aplicado, dejando así que la estructura del material se recupere de la deformación causada con el esfuerzo aplicado (recovery). Este proceso puede realizarse en un solo ciclo, incluyendo este solo un paso de deformación y uno de recuperación o en ciclos repetidos en el cual pueden realizarse varios pasos consecutivos de deformación-recuperación, en este caso es posible evaluar la deformación acumulada por la aplicación de cargas repetidas.

Se pretende usar la prueba de RCRT multi-esfuerzo, realizada en DSR, como una prueba adicional al método SUPERPAVE actualmente usado en México, al cual además se adicionan también pruebas empíricas como Recuperación Elástica por Torsión y Ductilometro, Penetración, Resiliencia etc., principalmente empleadas en asfaltos modificados.

A continuación se describirá el protocolo usado para el método RCRT.

El ensayo se realiza con la misma geometría del método SUPERPAVE, ambientando la temperatura por 600 segundos, que es la temperatura PG. Por ejemplo si se va a analizar un asfalto PG64-XX, la prueba debe de realizarse a 64° C.

Posteriormente se aplica un esfuerzo constante de 1.0 segundos de duración (creep), el esfuerzo máximo se alcanza en aproximadamente 0.02 segundos; seguido del lapso de recuperación de 9.0 segundos a esfuerzo cero (recovery). Se corren 20 ciclos a dos niveles de esfuerzo, los primeros 10 ciclos se realizan a 100 Pa (en el paso creep) y los siguientes 10 ciclos se llevan a cabo a 3200 Pa.

Es de gran importancia mencionar que el DSR no realiza otra acción durante el periodo de recuperación más que medir la respuesta del material, por lo que las mediciones en el segmento de recuperación dependen totalmente de la memoria elástica del material.

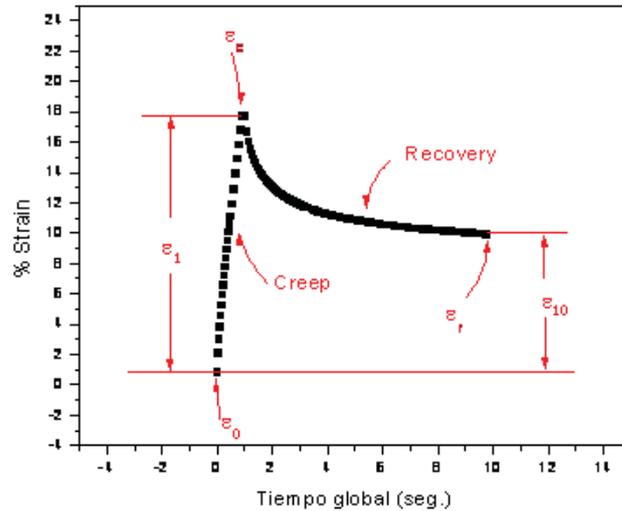


Figura 4.13 Esquema de un ciclo de creep-recovery (fuente: Sandoval, 2007).

Al aplicar dos niveles de esfuerzo, 100 y 3200 Pa, se puede evaluar la dependencia de la capacidad elástica del asfalto ante el esfuerzo de corte, además de que la diferencia entre los primeros 10 ciclos y los segundos 10 ciclos, en conjunto con la deformación total alcanzada al final de la prueba dan información sobre la estabilidad y fuerza de la red polimérica formada por el modificador en el interior del asfalto. Cuanto menor es la diferencia entre la recuperación elástica del segmento a 100 Pa y la del segmento a 3200 Pa, mas estable y resistente es la red polimérica del modificador.

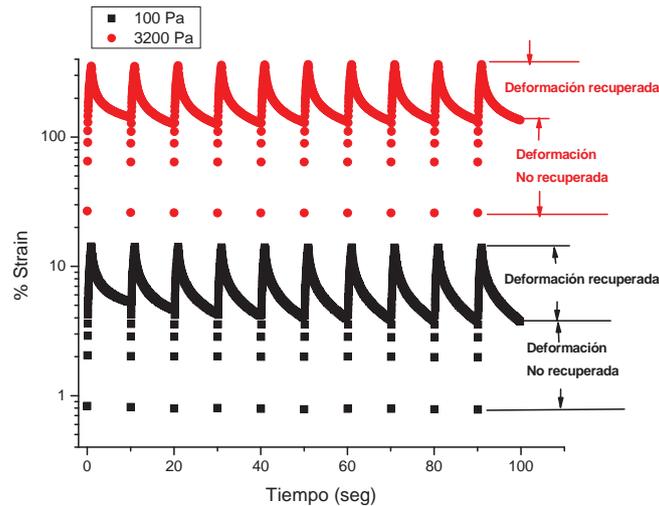


Figura 4.13 Creep-Recovery a 100 y 3200 Pa, Asfalto modificado con estructura fuerte. (fuente: Sandoval, 2007).

En la figura 4.13, se presenta un asfalto modificado con una estructura fuerte, la recuperación elástica en la fase de 100 Pa es alta, además de que se observa claramente que la diferencia entre las recuperaciones elásticas entre los dos esfuerzos 100 y 3200 Pa es pequeña, lo que indica que su estructura es resistente y no se ve afectada en gran medida por el aumento de esfuerzo y las deformaciones repetidas.

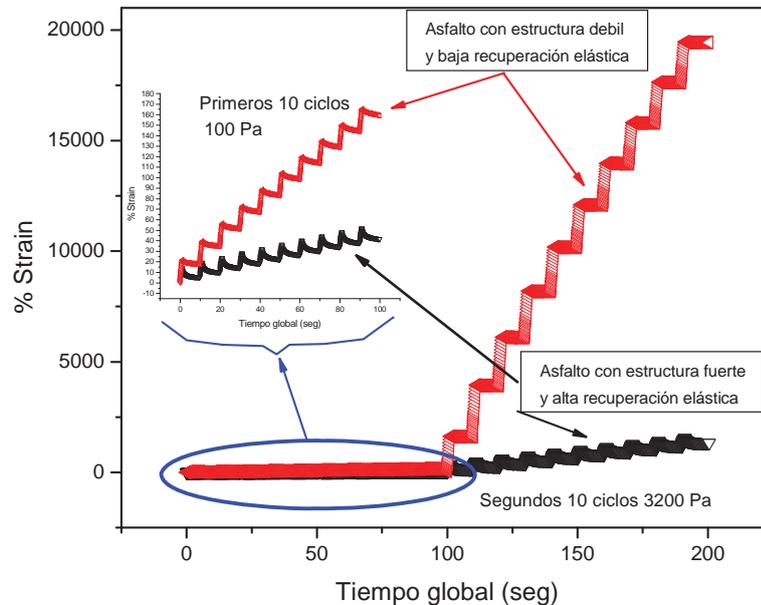


Figura 4.14 Asfaltos con diferente tipo de estructura ante Creep-Recovery (fuente: Sandoval, 2007).

En cada ciclo creep-recovery es necesario registrar cada uno de los siguientes parámetros:

- ❖ ϵ_0 Valor inicial para la deformación en el principio del segmento creep para cada ciclo.
- ❖ ϵ_c Valor de la deformación al final del segmento creep para cada ciclo.
- ❖ ϵ_1 Valor de la deformación total causada durante el segmento creep de cada ciclo, calculado como $\epsilon_c - \epsilon_0$.
- ❖ ϵ_r Valor de la deformación al final del segmento de recuperación de cada ciclo, es la deformación total acumulada hasta este ciclo.
- ❖ ϵ_{10} Valor de la deformación al final del segmento de recuperación de cada ciclo, calculado como $\epsilon_r - \epsilon_0$, es la deformación no recuperada en cada ciclo.

Además es importante tomar en cuenta la deformación total acumulada al final de los 20 ciclos ya que esta nos puede dar una idea más clara del comportamiento del asfalto, tanto de su resistencia ante la deformación como de su capacidad de recuperar las deformaciones.

4.3.- Descripción de los Asfaltos Utilizados.

Para esta investigación se emplearon cinco tipos de asfaltos, uno virgen y cuatro modificados, estos fueron modificados empleando modificadores con materias primas y procesos distintos cada uno.

A continuación se presenta una tabla con el nombre de cada asfalto empleado en la investigación.

Tabla 4.1 Asfaltos empleados.

#	Asfalto	Tipo
1	AC-20 Salamanca	Virgen
2	Asfalto con Elvaloy y Acido Polifosfórico	Modificado
3	Asfalto con polímero tipo E.V.A.	Modificado
4	Asfalto Oxidado con Acido Polifosfórico	Modificado
5	Asfalto con polímero tipo SB, SBS y Ag. Ret.	Modificado

Ahora se describirá el origen de cada asfalto, así como algunas características de estos.

1. AC-20 Salamanca: Procedente de la refinería de Salamanca en Guanajuato, empleado como base para los asfaltos modificados 2, 3 y 4.
2. Asfalto modificado con polímero Elvaloy 4170 y como catalizador Ácido Polifosfórico.
3. Asfalto modificado con Etil Vinil Acetato E.V.A.
4. Asfalto modificado oxidado con Ácido Polifosfórico.
5. Asfalto modificado Comercial, modificado con polímero tipo SB o SBS y agente de reticulación (Ag. Ret).

Los asfaltos modificados con polímero Elvaloy, EVA y Oxidado son fabricados en laboratorio, el asfalto modificado SBS, fue proporcionado por una empresa productora de asfalto modificado.

4.4.- Análisis Reológico de los Asfaltos Utilizados.

Uno de los objetivos de esta investigación es el de evaluar las características reológicas de cada uno de los asfaltos de mayor empleo comercial en México, descritos anteriormente, por cada método mencionados en este trabajo. Es importante señalar que todos los estudios reológicos se realizaron por la empresa **SURFAX S.A. de C.V.**, en el área de asfaltos a cargo del Ing. **Israel Sandoval Navarro**. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los métodos empleados para el análisis de las características reológicas de cada asfalto, así como el parámetro a evaluar por cada método.

Tabla. 4.2 Parámetro reológico a evaluar por cada método empleado.

Método	Parámetro evaluado
SUPERPAVE	$ G^* / \text{sen } \delta$
SUPERPAVE Refinado	$\frac{ G^* }{1 - (1 / \tan \delta \text{sen } \delta)}$
Viscosidad a Corte Cero	Log (η_0)
Creep Repetido	% ϵ_r (100Pa) , % ϵ_r (3200Pa) , % deformación total acumulada

4.4.1.- METODO SUPERPAVE.

Se determinó el grado de desempeño empleando el método SHRP-SUPERPAVE conforme a la metodología AASHTO TP-5 o su homólogo en la normativa Mexicana M-MMP-4-05-025/02, el análisis se realizo en un Reómetro de Corte Dinámico AR-2000, la prueba evaluó a las temperaturas de 70, 76 y 82°C, controlada por deformación a 10% para asfalto original y 12% para asfalto envejecido por RTFO. El esfuerzo aplicado es el necesario para causar las deformaciones antes mencionadas y es determinado por el reómetro.

Tabla. 4.3 Método SUPERPAVE.

Tipo de Asfalto Modificado	PG	T _f (°C) G*/senδ>2.2kPa	δ (°)	G*/sen δ (kPa)
AC-20 Salamanca virgen	70	71.32	80.83	2.56
Elvaloy + Acido Polifosfórico	76	81.9	58.82	3.57
SB, SBS + Agente Reticulante	76	77.51	67.81	2.56
Oxidado con Acido Polifosfórico	76	79.00	71.65	2.98
E.V.A.	76	80.06	75.17	3.49

El método SUPERPAVE clasifica los asfaltos modificados como PG 76-XX (tan solo el AC-20 Salamanca que se usa solo como referencia se clasifica como PG 70-XX), a pesar de que se presentan en algunas de las muestras de asfalto modificado muy poca recuperación elástica, por ejemplo los modificados con E.V.A. y el Oxidado con Ácido Polifosfórico, en cambio otros presentan recuperaciones elásticas altas como el modificado con Elvaloy y el modificado con polímero tipo SBS. Estas diferencias se explican en la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Análisis empírico de los asfaltos.

Tipo de Asfalto Modificado	PG (RTFO)	Rec. Elástica por Torsión 25 °C (%)	Rec. Elástica por Ductilometro 25 °C (RTFO) (%)	Viscosidad Brookfield 135°C (RTFO) (cP)
AC-20 Salamanca virgen	70	9	33	735
Elvaloy + Acido Polifosfórico	76	50	79	3673
SB, SBS + Agente Reticulante	76	60	82	1733
Oxidado con Acido Polifosfórico	76	13	38	588
E.V.A.	76	20	44	1342

Es importante observar el valor de la viscosidad brookfield (medida a 135°C en el asfalto envejecido) éste indica la resistencia al flujo que ofrece cada uno de los asfaltos modificados, de igual forma los valores más elevados corresponden a los asfaltos modificados con Elvaloy y modificado con polímero tipo SB, SBS, cuanto mayor es la viscosidad más difícil es que el asfalto se deforme.

Este es uno de los motivos por los cuales los técnicos en asfaltos en el mundo y especialmente los creadores de SHRP se han dado a la tarea de buscar otros parámetros y métodos para la caracterización de asfaltos y principalmente para poder predecir el desempeño que tendrá el asfalto en campo de una forma más real.

4.4.2.- Criterio SUPERPAVE Refinado.

El procedimiento para determinar el grado de desempeño mediante SUPERPAVE REFINADO es el mismo que en SHRP-SUPERPAVE, conforme a la metodología AASHTO TP-5 o su homólogo en la normativa Mexicana M-MMP-4-05-025/02, la única diferencia es que el parámetro a evaluar es $G^*/(1-1/\text{sen } \delta \tan \delta)$ y no $G^*/\text{sen } \delta$.

El análisis se llevó a cabo en un Reómetro de Corte Dinámico AR-2000, la prueba evaluó a las temperaturas de 70, 76 y 82 y en algunos casos 88 °C, controlada por deformación a 12% para asfalto envejecido por RTFO. El esfuerzo aplicado es el necesario para causar las deformaciones antes mencionadas y es determinado por el reómetro.

Tabla 4.5 Método SUPERPAVE refinado.

Tipo de Asfalto Modificado	SUPERPAVE, $G^*/\text{sen}\delta > 2.2\text{kPa}$			SUPERPAVE REFINADO, $G^*/1-(1/(\tan\delta\text{sen}\delta)) > 2.2\text{kPa}$		
	PG	T_f (°C)	δ (°)	PG	T_f (°C)	ΔT_f (°C)
AC-20 Salamanca virgen	70	71.32	80.83	70	72.33	1.01
Elvaloy + Acido Polifosfórico	76	81.9	58.82	88	91.46	9.56
SB, SBS + Agente Reticulante	76	77.51	67.81	76	81.84	4.33
Oxidado con Acido Polifosfórico	76	79.00	71.65	76	81.71	2.71
E.V.A.	76	80.06	75.17	76	81.11	1.05

Aunque el método SUPRPAVE $G^*/\text{sen}\delta$ clasifica a todos los asfaltos modificados como PG 76-XX, el método SUPERPAVE REFINADO $G^*/1-(1/(\tan\delta\text{sen}\delta))$ resalta una notable diferencia en el asfalto modificado con Elvaloy y Ácido Polifosfórico PG 88-XX con una temperatura de falla de 91.4°C, es importante mencionar la diferencia entre el ángulo de fase de este asfalto 58.82° y los de los demás modificados 67.8, 71.6 y 75.17°. Cabe señalar que el aumento en la temperatura de falla es inversamente proporcional al valor del ángulo de fase. Es por este motivo que el método SUPERPAVE refinado da mayor importancia al ángulo de fase.

4.4.3.- Viscosidad a CORTE CERO.

Para la determinación del grado de desempeño mediante la viscosidad a corte cero η_0 se realizaron barridos de frecuencia de 0.1 a 100 rad/seg, (ó de 0.01 a 100 rad/seg en los casos que fue necesario), el esfuerzo aplicado es el mismo empleado en la metodología SUPERPAVE (cuando la prueba es controlada por esfuerzo) y en un rango de temperaturas de 30 °C al rededor de la temperatura de falla determinada con el método SUPERPAVE. Se genera una gráfica de comportamiento de $\text{Log}(\eta_0)$ vs T de la cual se determinó la temperatura de falla y el grado de desempeño, para cada uno de los asfaltos modificados.

Se determinó el valor del parámetro $\text{Log}(\eta_0) = 2.39$ para asfaltos envejecidos RTFO, este valor se obtuvo de curvas de comportamiento de asfaltos vírgenes, como se mencionó en el apartado de Viscosidad a Corte Cero en la descripción de los métodos de caracterización reológicos.

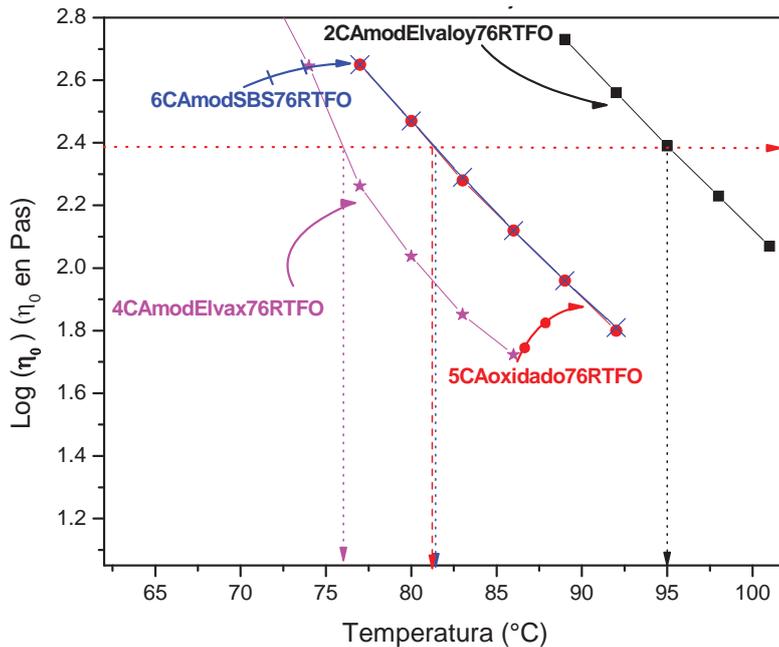


Figura 4.15 Curvas de comportamiento de asfaltos modificados envejecidos RTFO. (fuente: Sandoval, 2007l).

Tabla 4.6 Método Viscosidad a Corte Cero.

Tipo de Asfalto Modificado	SUPERPAVE, G*/senδ>2.2kPa			Viscosidad a Corte Cero Log(η₀)> 2.39		
	PG	T _f (°C)	δ (°)	PG	T _f (°C)	ΔT _f (°C)
AC-20 Salamanca virgen	70	71.32	80.83	70	71.32	0.00
Elvaloy + Acido Polifosfórico	76	81.9	58.82	94	94.9	13.00
SB, SBS + Agente Reticulante	76	77.51	67.81	76	81.31	3.80
Oxidado con Acido Polifosfórico	76	79.00	71.65	76	81.19	2.19
E.V.A.	76	80.06	75.17	76	76.06	- 4.0

Empleando como parámetro para estimar el desempeño del asfalto, la Viscosidad a Corte Cero, se obtienen resultados con la misma tendencia entre las temperaturas de falla del método SUPERPAVE REFINADO y de igual forma la diferencia de estos contra los resultados del método SUPERPAVE.

Este método también resalta un notable aumento en la temperatura de falla del asfalto modificado con Elvaloy y Ácido Polifosfórico de 13°C esto se relaciona con su ángulo de fase bajo 58.82° y su alta resistencia al flujo, ofreciendo con esto la mayor resistencia ante la deformación permanente, además el aumento en los asfaltos modificados con polímero tipo SB, SBS y el oxidado con Ácido Polifosfórico son más o menos del mismo orden en los dos métodos.

4.4.4.- CREEP REPETIDO.

Esta metodología se llevo a cabo bajo las siguientes condiciones:

Se realizaron 20 ciclos Creep-Recovery divididos en dos segmentos de 10 ciclos cada uno.

a) Primeros 10 ciclos:

Se empleó un esfuerzo de 100 Pa con un periodo de Creep de 1 segundo y 9 segundos en el periodo de Recovery (Recuperación).

b) Segundos 10 ciclos:

Se empleó un esfuerzo de 3200 Pa con un periodo de Creep de 1 segundo y 9 segundos en el periodo de Recovery (Recuperación).

Se realizan los siguientes cálculos:

Promedio de porcentaje de recuperación elástica en los primeros 10 ciclos a 100 Pa

$$\% \varepsilon_r(100, prom.) = \sum(\varepsilon_r(100, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

Promedio de porcentaje de recuperación elástica en los segundos 10 ciclos a 3200 Pa

$$\% \varepsilon_r(3200, prom.) = \sum(\varepsilon_r(3200, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

Diferencia absoluta entre los porcentajes de recuperación elástica a 100 y 3200 Pa

$$Rdif(100Pa - 3200Pa) = \% \varepsilon_r(100, prom.) - \% \varepsilon_r(3200, prom.)$$

Además se toma en cuenta la deformación máxima acumulada después de los 20 ciclos Creep-Recovery. Las pruebas se realizaron a la temperatura de grado de desempeño 76°C (70°C para el asfalto virgen), enseguida se presentan los resultados.

En la siguiente grafica se presenta el comparativo de las pruebas de Creep-Recovery para todos los asfaltos analizados en este estudio, la deformación alcanzada es la acumulada al final de los 20 ciclos, los primeros 10 a 100Pa y los 10 siguientes a 3200 Pa la temperatura de prueba fue de 76 °C.

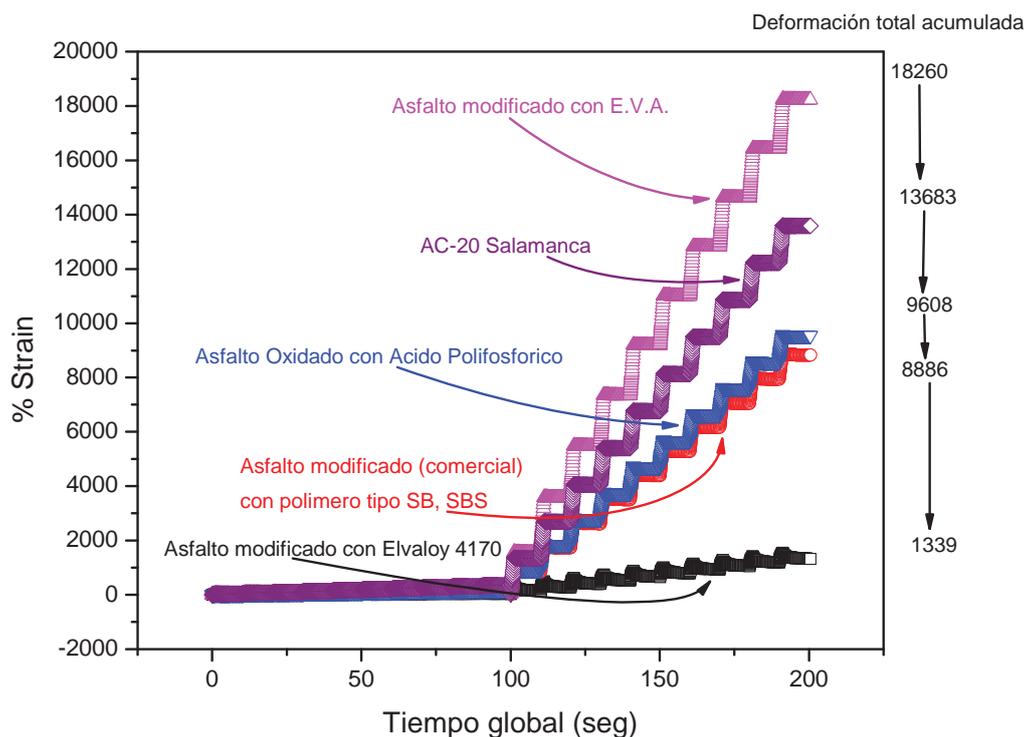


Figura. 4.16 Gráficas creep-recovery de los asfaltos en estudio (fuente: Sandoval, 2007).

Tabla 4.7 Método Creep-Recovery.

Tipo de Asfalto	SUPERPAVE, G*/senδ>2.2kPa			Temp. de Prueba	% ε _r a 100 Pa	% ε _r a 3200 Pa	Rdif (100Pa- 3200Pa)	% Def. máxima acumulada
	PG	T _f (°C)	δ (°)					
Valores recomendables	---	---	---	---	---	15 mínimo	70 máximo	---
AC-20 Salamanca virgen	70	71.32	80.83	70	2	0 (-6)	8	13683
Elvaloy + Acido Polifosfórico	76	81.9	58.82	76	75	68	7	1339
SB, SBS + Agente Reticulante	76	77.51	67.81	76	32	11	21	8886
Oxidado con Acido Polifosfórico	76	79.00	71.65	76	26	0 (-3)	29	9608
E.V.A.	76	80.06	75.17	76	27	0 (-3)	30	18260

% ε_r: Porcentaje de recuperación elástica en Creep Repetido.

Rif: Diferencia entre % ε_r a 100 Pa y % ε_r a 3200 Pa.

% Def. máxima acumulada: Deformación alcanzada al final de los 20 ciclos Creep-Recovery.

En la tabla anterior se presenta un comparativo entre los resultados de los diferentes asfaltos, Recuperación Elástica en creep repetido, a 100 y 3200 Pa, la diferencia entre las recuperaciones elásticas de estos dos niveles de esfuerzo y la deformación máxima acumulada.

Se establece un valor mínimo a la recuperación elástica a 3200 Pa porque algunos asfaltos modificados con plastómeros podrían presentar buena elasticidad a 100 Pa pero al aumentar el nivel de esfuerzo a 3200 se da una caída importante en este comportamiento, por lo que a este esfuerzo es más fácil encontrar diferencias.

El máximo en la diferencia entre 100 y 3200 Pa se establece porque se pretende garantizar la estabilidad de la estructura de asfalto al recibir una carga. La estabilidad puede estimarse basándose en la linealidad de su comportamiento elástico al variar el esfuerzo.

4.5.- Comentarios del Análisis Reológico.

El mejor desempeño lo exhibió el asfalto modificado con Elvaloy y Ácido Polifosfórico, presentando la menor acumulación de deformación permanente, gracias a su alta capacidad de recuperar las deformaciones causadas al aplicarle un esfuerzo. Este comportamiento se comprueba a lo largo de los diferentes métodos evaluados, SUPERPAVE (en el cual presento PG76-XX), SUPERPAVE refinado (en que alcanzo PG 88-XX), Viscosidad a Corte Cero (en el cual alcanzó PG 94-XX) y Creep Repetido, en todos los anteriores presentó el mejor desempeño ante la deformación permanente.

El asfalto modificado con polímero tipo SBS y el Oxidado con Ácido Polifosfórico presentan un desempeño similar, tendencia que se presentó en los análisis reológicos evaluados, en los métodos SUPERPAVE , SUPERPAVE refinado y Viscosidad a Corte Cero ambos mantuvieron el PG 76 con cercana temperatura de falla.

El desempeño más bajo lo presentó el asfalto modificado con polímero tipo E.V.A. el cual mediante el método SUPERPAVE presento un PG76-XX y aunque en los métodos SUPERPAVE refinado y Viscosidad a Corte Cero mantuvo el grado 76-XX, en las pruebas de Creep Repetido acumulo la mayor cantidad de deformación permanente. Esto puede explicarse por varias razones, el tener un ángulo de fase alto de aproximadamente 75° , lo convierte en un asfalto con una alta capacidad de disipar energía lo que explica que ofrezca poca resistencia al flujo, siendo un asfalto fácil de deformar. Además la pobre capacidad elástica reflejada tanto por el ángulo de fase como por las recuperaciones elásticas por torsión (de 20%) y por ductilómetro (de 44%) en cierta medida explican su poca capacidad para recuperar las deformaciones causadas al aplicarle un esfuerzo.

El hecho de que el asfalto modificado con polímero tipo SBS presentará un comportamiento similar al del asfalto Oxidado, a pesar de que presentará los valores más altos de Recuperaciones elásticas

por torsión de 60% y por ductilómetro de 83%, en el análisis empírico, se puede explicar de la siguiente forma:

El comportamiento de los materiales viscoelásticos es altamente dependiente de la temperatura y del esfuerzo aplicado. Aunque a temperaturas relativamente bajas como 25°C, a la cual se llevan a cabo las pruebas de recuperación elástica (por torsión y ductilómetro) domina la componente elástica, al subir la temperatura de trabajo el dominio va pasando a la componente viscosa, lo que provoca que el asfalto modificado de ser un asfalto con una alta capacidad elástica se convierta en un asfalto con capacidad alta de disipar energía, lo que lo hace fácil de deformar y poco capaz de recuperar las deformaciones. Por otro lado al aplicar esfuerzos grandes la estructura no es capaz de resistir dichos esfuerzos y cede ante el corte provocando deformaciones importantes.

Si consideramos de manera global los resultados obtenidos por los cuatro métodos analizados en este capítulo, en cuanto a las características reológicas de los asfaltos, podemos enlistar una clasificación considerando de mayor a menor desempeño de los asfaltos, la cual se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Clasificación de los asfaltos considerando sus propiedades reológicas.

Posición	Mezcla
1	Elvaloy
2	SBS
3	Oxidado
4	EVA
5	Salamanca AC-20



Capítulo 5.

Pista de Ensayo UMICH.

5.1.- Introducción.

Durante las últimas décadas, el transporte por carreteras ha experimentado un aumento de la tasa de vehículos y de las cargas por eje, además de haberse incrementado el nivel de demanda de los usuarios por mejores estándares de confort y seguridad. Por su parte, las administraciones han requerido desde siempre pavimentos con mayor vida útil, menores intervenciones de mantenimiento y un costo inicial razonable.

En ocasiones, el estado de un pavimento alcanza niveles de servicio inadecuados que impiden un tránsito confortable y seguro. Los esfuerzos y deformaciones producidos por el tráfico pesado, a lo largo de la vida en servicio de los pavimentos flexibles, causan daños de diferente naturaleza y grado de severidad. Estos deterioros pueden caracterizarse de distintas maneras: deformaciones plásticas (ahuellamiento), fisuras, desprendimientos, etc.

Las deformaciones permanentes o ahuellamientos producidos en las mezclas asfálticas son uno de los modos más frecuentes de falla que se producen sobre los pavimentos y consisten en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Este fenómeno se ha visto incrementado en los últimos años en los pavimentos asfálticos debido a la combinación de elevado nivel de tránsito, cargas pesadas y/o lentas y altas temperaturas de servicio.

La estimación de la deformación permanente en materiales de pavimentación depende en gran medida de los métodos de ensayo y de los procedimientos que se utilizan para la fabricación de los

especímenes de prueba. Estas variaciones en conjunto con la incertidumbre del tránsito y las condiciones ambientales hacen extremadamente difícil la predicción de la profundidad de las roderas.

La deformación permanente es un importante factor en el diseño de pavimentos flexibles. Los métodos mecanicistas o metodologías de diseño racional, han incorporado un importante aspecto a tener en cuenta y es la certeza del comportamiento de los materiales usados en la estructura del pavimento. Ello nos acerca a reducir notablemente los factores de seguridad y tener probabilidades de falla pequeñas en cuanto se manejen equipos de laboratorio que generen resultados cada vez más reales.

Una mejora en los métodos de predicción actuales podría contemplar, una extensión del análisis de los esfuerzos a partir de la línea central de la aplicación de la carga hacia toda la zona de influencia, empleando una técnica de elementos finitos, y así tomar en cuenta la contribución a la deformación permanente que tienen los esfuerzos de corte que ocurren en las inmediaciones de los neumáticos.

Además también resulta de gran importancia reproducir de manera más fiel en el laboratorio, los estados de esfuerzos a los que está sujeto el pavimento en campo. Con respecto a lo anterior, el programa estratégico de investigación de carreteras de Estados Unidos (SHRP) ha concluido que las pruebas de laboratorio que han resultado más prometedoras en cuanto a la evaluación de la resistencia a la deformación de los materiales, son las siguientes:

- a) Pruebas de esfuerzos uniaxiales.
- b) Pruebas de esfuerzos triaxiales.
- c) Pruebas diametrales.
- d) Pruebas de simulación.
- e) Pruebas cortantes.
- f) Pruebas empíricas.

En el panorama internacional, el método de diseño propuesto por Superpave ha incorporado novedosos equipos y criterios como respuesta a las condiciones actuales de servicio de las carpetas asfálticas, sin embargo el costo de adquisición es muy alto para países con recursos más limitados.

En España se han hecho estudios para evaluar los beneficios de incorporar ensayos adicionales en el diseño de mezclas asfálticas, con una adecuada relación costo/beneficio, empleando el método Marshall. Estos ensayos adicionales determinan la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones plásticas permanentes que son variables importantes en el diseño de mezclas asfálticas.

De los ensayos adicionales incorporados el de mayor interés en esta investigación es uno clasificado como de simulación y es conocido como pista de ensayo. En lo relacionado a la pista de ensayo, existen diferentes modelos de la pista de ensayo en muchos países pero todos coinciden en su principal objetivo: simular en laboratorio las sollicitaciones que producen la aparición de deformaciones plásticas permanentes en el pavimento.

En este capítulo describiremos el equipo construido por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que consiste en un equipo de pista y este sigue las especificaciones marcadas por la normativa española.

5.2.- Pruebas de Simulación.

Las pruebas de simulación incluyen principalmente las pruebas de rodada. El analizador de pavimentos asfáltico (APA), el dispositivo de rodada de Hamburgo (HWTD), el probador de roderas francés (FRT) y la pista de ensayo (PE) parecen proveer resultados razonables y tienen alguna información correlacionada con el comportamiento. A pesar de que las pruebas de rodada no son mecanicistas parecen tener resultados aceptables que simulan lo que sucede en campo. Es importante mencionar que en su mayoría las pruebas que han sido evaluadas por su habilidad para predecir el comportamiento, actualmente han sido comparadas a uno de estos dispositivos de rodada que ya que ellas simulan las roderas en el laboratorio. Basándose en toda la información disponible, se recomienda que el APA, HWTD, FRT Y PE sean consideradas para su uso en el diseño de mezclas y control de calidad. La información disponible es suficiente para fijar criterios y utilizarse posteriormente en las recomendaciones. Las pruebas de simulación (pruebas de rodada) parecen ser el único tipo de pruebas que están listas para una adopción inmediata.

Hamburgo Wheel Tracking Test. (HWTD)

El aparato de Hamburgo fue desarrollado en 1970 por la compañía Esso de la ciudad de Hamburgo en Alemania basado en un equipo de características similares de origen inglés desarrollado por el Road Research Laboratory.

Mediante el aparato de Hamburgo es posible medir el efecto combinado del ahuellamiento y los daños causados por el agua a una mezcla asfáltica tipo concreto, sumergida en un baño de agua que se encuentra a una temperatura de 50 °C.

En 1962 (Pinilla A.) en el LEMIT se construyó un equipo para medir adherencia bajo tránsito de mezclas preparadas en el laboratorio, conocido como Wheel Tracking Test (WTT). Este equipo había sido desarrollado por el Road Research Laboratory de Inglaterra. En razón de que el WTT guarda cierta similitud con el aparato de Hamburgo, se decidió adecuarlo a las actuales exigencias de este aparato.

Cabe recalcar que el aparato de Hamburgo es empleado en la actualidad por los principales centros de investigación de Europa y los EE.UU.

El equipo consiste en una rueda de acero de 203,6 mm de diámetro y 47 mm de ancho que ejerce una carga de 705 N (71 Kg.) sobre una probeta de la mezcla asfáltica de aproximadamente 30 cm. x 30 cm. x 5 cm. (Preparada en el laboratorio o tomada del pavimento) y colocada en un molde de acero de las dimensiones antes citadas. La rueda se mueve recíprocamente a razón de 50 pasadas por minuto alcanzando una velocidad de aproximadamente 0,305 m/s en el punto medio de la probeta. La muestra se encuentra sumergida en un baño de agua que se encuentra termostata a 50 °C. El equipo dispone de un sistema de registro automático computarizado que registra las deformaciones producidas por la rueda en función del número de pasadas de la misma. En la Figura 5.1 se aprecia una foto del equipo.

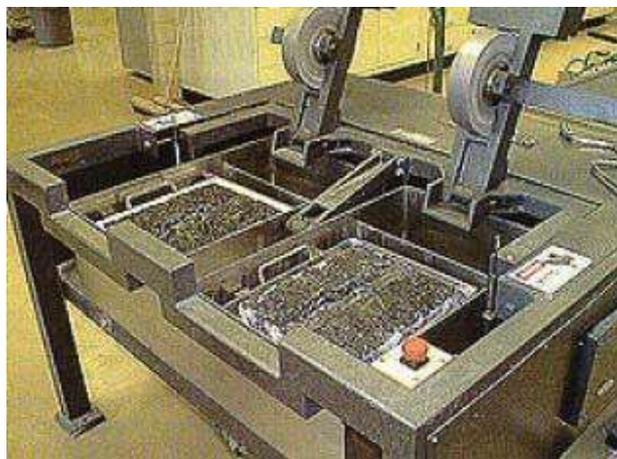


Figura 5.1 Hamburg Wheel-Tracking Device (HWT) (fuente: www.asphaltwa.com).

La muestra a ensayar puede ser proveniente de un pavimento en funcionamiento o bien preparada en el laboratorio mediante un mezclador a la temperatura óptima de mezclado previamente determinada. La mezcla suelta se deja envejecer durante dos horas en una estufa calentada a la temperatura de compactación, previamente calculada de acuerdo al tipo de ligante a emplear.

A continuación la mezcla se coloca en el molde de ensayo y es compactada mediante un compactador neumático hasta alcanzar la densidad predeterminada. La Federal Highway Administration en el Fairbank Highway Research Center aconseja que para mezclas densamente graduadas el contenido de vacíos debe ser de 7 ± 1 %, mientras que para mezclas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) de $5,5 \pm 0,5$ %. Los Departamentos de Transporte de Colorado y Texas también tienen las mismas exigencias para el contenido de vacíos.

La muestra preparada en el Laboratorio o proveniente de un pavimento previamente termostata a 50 °C es repetitivamente cargada mediante la acción alternativa de la rueda de acero. La deformación producida es graficada en función del número de pasadas.

Para considerar el desempeño de un agregado pétreo respecto a sus características de adherencia, el Departamento de Transportes de Texas tiene en cuenta la consistencia de los ligantes empleados en base a su PG, para lo cual aconseja tomar como valores límites del ensayo, el número de pasadas para alcanzar una profundidad de huella o deformación de 12,5 mm.

Georgia Load Wheel Tester. (GLWT)

El GLWT fue desarrollado a mediados de los 80 en Georgia a partir de modificaciones introducidas a un modelo diseñado por C.R. Benedict de Benedict Slurry Seals. Inc., para ensayar lechadas de asfalto (slurry seals) a los fines de elaborar un instrumento que permitiera realizar ensayos de medición de ahuellamiento en laboratorio así como también control de calidad en obra de mezclas asfálticas en caliente.



Figura 5.2 Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT) (fuente: www.asphaltwa.com).

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

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

Asphalt Pavement Analyzer. (APA)

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

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

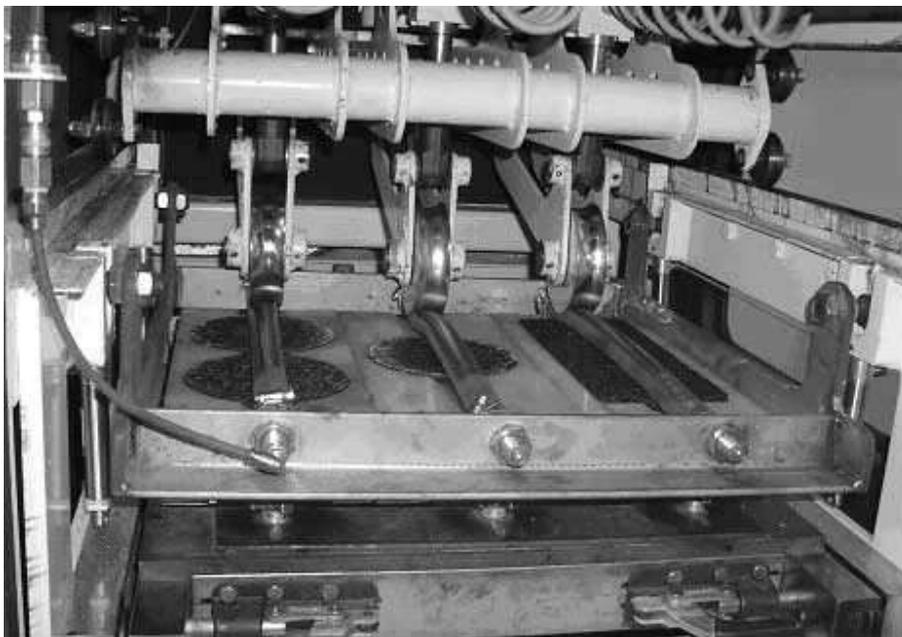


Figura 5.3 Asphalt Pavement Analyzer (APA) (fuente: www.asphaltwa).

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

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

Purdue University Laboratory Wheel- Tracking Device.

Este ensayo de rueda cargada se desarrolló en la Universidad de Purdue y presenta similitud con el ensayo de Hamburgo, ya que permite determinar el ahuellamiento potencial y sensibilidad a la

acción de la humedad. Aplica una presión de 620 kPa sobre la muestra (de campo o laboratorio) con una velocidad de 33.2 cm/seg a través de una rueda neumática inflada a una presión de 793 kPa.

Las dimensiones de la probeta utilizada son de 50 cm de longitud, 18 cm de ancho y de 1 a 5 cm de espesor. Las muestras son rectangulares (29 cm x 31 cm) y su espesor es función del tipo de mezcla que se está ensayando: superficiales 3.8 cm; mezclas de base 5.1 cm y mezclas asfálticas gruesas para base 7.6 cm.

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



Figura 5.4 Máquina de ensayo, Purdue University Laboratory Wheel Tracking (fuente: www.asphaltwa).

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

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

French Wheel Tracker (FWT).

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

La metodología de este aparato es similar a las ya descritas; una carga de 5000 N es aplicada a una rueda neumática de 40 cm x 8 cm con una presión de inflado de 600 kPa, a una velocidad de 194.44 cm/seg (67ciclos/min).

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

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



Figura 5.5 Máquina FWT (fuente: www.asphaltwa).

Ensayo de Máquina Pista de laboratorio Español

Este equipo (Figura 5.2.6) permite determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica, tanto en casos de proyectos de mezclas en el laboratorio como en el de testigos procedentes de pavimentos.

El ensayo consiste en someter una probeta de mezcla asfáltica que puede ser prismática (30 cm x 30 cm x 5 cm, una densidad del 97%), sometida al paso alternativo de una rueda metálica de 20 cm de diámetro, recubierta con 10 a 20 mm de caucho (dureza 80 escala Dunlop), con una frecuencia

de 42 ciclos/min, en condiciones determinadas de presión de 900 kPa sobre la(s) probetas a una temperatura de 60 °C, midiéndose periódicamente la profundidad de deformación producida.

El ensayo termina a las 5040 pasadas, los resultados obtenidos, para una temperatura y frecuencia de ensayo dada, manifiestan la deformación acumulada en el centro de la probeta y la velocidad de deformación expresada en mm/min, para diferentes periodos de tiempo (1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105, 120 minutos). Una vez finalizado el ensayo se grafican los resultados en una curva de deformación en función del tiempo y la velocidad de deformación.



Figura 5.6 Máquina de ensayo de la Universidad Politécnica de Cataluña (fuente: Padilla, 2004).

5.3.- Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Ante la necesidad imprescindible de un país en vías de desarrollo de mantenerse a la vanguardia en el diseño de las mezclas asfálticas logrando un equilibrio entre su economía y la adquisición de tecnología. En donde el equilibrio es aun más importante para aquellos países que disponen de recursos económicos limitados por lo que la selección deberá ser evaluada con estudios bien fundamentados.

Históricamente México es considerado como pionero en el uso del método Marshall para el diseño de sus mezclas asfálticas densas, sin embargo, las condiciones de servicio a las que actualmente se ve sometido un pavimento asfáltico son muy distintas a las de antaño. Actualmente, los criterios para evaluar la calidad de las carpetas asfálticas distinguen aquellas que son diseñadas para una intensidad de tránsito superior a un millón de ejes equivalentes de las que se considera que presentan menores solicitaciones.

El deterioro funcional de una mezcla asfáltica conocido como profundidad de rodera es ocasionado por la falta de resistencia de la mezcla a la deformación y su posterior recuperación. En años anteriores, se generaron en el Departamento de Vías Terrestres de la UMSNH, las primeras inquietudes de estudiar el fenómeno de deformación plástica en mezclas asfálticas, y no fue hasta el año 2006, con el desarrollo de una máquina de pista denominada Ensayo de Pista de Laboratorio UMICH, cuando se publican los primeros resultados obtenidos en el Laboratorio de Materiales Asfálticos de la Facultad de Ingeniería Civil, de la UMSNH, a partir de los cuales se ha podido dirigir el entendimiento en el funcionamiento de diferentes tipos de mezclas asfálticas frente a este tipo de deterioro.

Debido a la necesidad de estar a la vanguardia sobre los estudios acerca de la caracterización de mezclas asfálticas y la predicción de deformaciones plásticas, un grupo de investigadores relacionados con este tema, pertenecientes al departamento de Vías Terrestres de la Facultad de Ingeniería Civil se dio a la tarea de diseñar un prototipo en la Universidad Michoacana, similar a la Pista de Ensayo de Laboratorio Española, siguiendo los lineamientos que marca la normativa española NLT-173/00 *“Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”*. Variando de esta en la configuración de los especímenes ensayados, los cuales son de forma cilíndrica con un diámetro de 10 cm o 15 cm y espesor de 5 cm; ya sea que se fabriquen en laboratorio o sean extraídos de un pavimento en servicio. Otra de las variables con respecto a la norma española que es importante mencionar es la compactación de los especímenes ya que para esta se adoptó utilizar el martillo Marshall o el compactador giratorio de SUPERPAVE. Cabe mencionar que es la primera máquina que se tiene para realizar ensayos de deformación plástica en el Estado de Michoacán. Lo que coloca a la Universidad Michoacana a la cabeza como principal institución en lo referente a la investigación del análisis del comportamiento de las condiciones de actuales de servicio de las carreteras nacionales.

El equipo es operado neumáticamente y fue diseñado, construido y puesto apunto por el Departamento de Vías Terrestres de la misma Universidad. El esquema del mismo (Figura 5.3) es similar al de que marca la norma española.

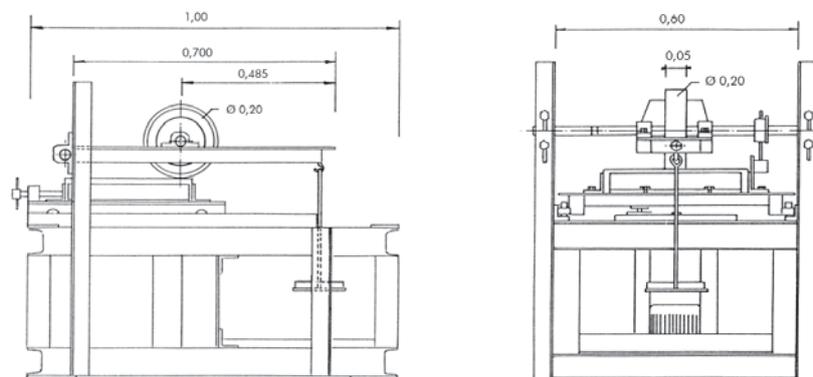


Figura 5.7 Esquema de la Máquina Pista del Laboratorio de la UMICH.

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 tránsito al que esta sometido día a día, aplicando la carga de manera repetitiva durante un tiempo determinado.

Es importante mencionar que los primeros estudios realizados en el equipo de pista de la UMICH fueron realizados por los ingenieros José Ayala y Salvador Alvarado, donde encontraron que los resultados obtenidos con el equipo presentaron muy buenas correlaciones con los comportamientos esperados. Ellos fueron los pioneros que dirigieron el rumbo hacia los estudios en la Máquina de Pista.

5.4.- Descripción del Equipo.

Esencialmente la Pista de Ensayo UMICH utilizada para medir las deformaciones plásticas, es un equipo que aplica una carga constante sobre los especímenes evaluados, cuyo principal objetivo es el de simular el tránsito al que está sometido en condiciones de servicio, aplicando la carga de manera repetitiva durante un tiempo especificado, en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

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

El equipo de pista se compone básicamente de 4 unidades:

❖ Unidad de alimentación de presión de aire.

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



Figura. 5.8 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 encuentran una unidad de mantenimiento, ubicada en la parte exterior del gabinete y es la encargada como su nombre lo dice del mantenimiento del equipo, ya que consta de un filtro sinterizado que separa el agua y todas las sustancias y partículas que afecten el funcionamiento del equipo, así como de un control de presiones que regula y mantiene la presión constante independientemente de las oscilaciones de presión que sufra la red a raíz del consumo de aire, también se cuenta con un dispositivo de lubricación que dosifica una pequeña cantidad de aceite con el aire para que el equipo se encuentre en lubricación constante y trabaje de una forma adecuada, además se cuenta también con una válvula de cierre de accionamiento manual, para cortar la alimentación del aire en caso de que esto sea necesario.

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



Figura. 5.9 Unidad control y mantenimiento.

❖ Cámara termostática.

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

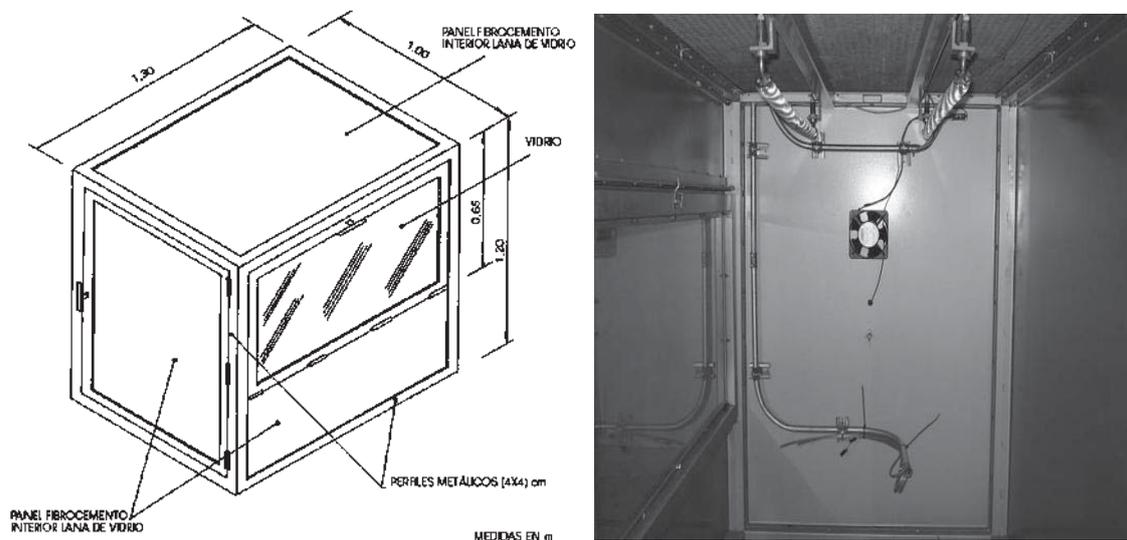


Figura 5.10 Cámara Termostática.

❖ 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, simulando presiones de contacto de 9 kgf/cm^2 (Eje equivalente de 13.0 toneladas) o $5,6 \text{ Kgf/cm}^2$ (Eje Equivalente de 8,2 Toneladas), el brazo esta provisto en uno de sus extremos de una extensión que sirve de superficie de medida, la cual aloja un micrómetro que registra la deformación acumulada durante el ensayo.



Figura 5.11 Unidad de aplicación de carga.



Figura 5.12 Unidad de desplazamiento.

5.5.- Procedimiento de la Prueba.

En forma simple se puede resumir el procedimiento del ensayo de pista UMICH de la siguiente forma: se fabrican los especímenes con las características deseadas previamente seleccionadas; el ensayo tiene una frecuencia de aplicación de carga de 42 pasadas/ minuto, con una presión de contacto de 9 Kgf/cm² para una carga por Eje Equivalente de 13,0 Toneladas; las probetas se ensayan hasta que hayan alcanzado una temperatura de 60°C la cual se mantiene en la cámara termostática de la máquina durante el tiempo que dura el ensayo. De lo mencionado anteriormente podemos decir que el procedimiento se divide en tres etapas: fabricación de las probetas, acondicionamiento de la temperatura de ensayo y ejecución del ensayo.

❖ Fabricación de las probetas.

El procedimiento de ensayo inicia desde la fabricación de especímenes a ensayar, previamente seleccionados la granulometría, la cantidad de asfalto, porcentaje de vacíos, etc.; como se mencionó anteriormente el Ensayo de Pista UMICH se distingue de su similar española, por la forma de los especímenes a ensayar, ya que esta está planeada para evaluar probetas cilíndricas, compactadas por medio del martillo Marshall, debido a que es uno de los equipos más comunes en cualquier laboratorio de materiales del país. De igual forma se puede utilizar el compactador giratorio SUPERPAVE, para la fabricación de las probetas, debido a que actualmente es el procedimiento de compactación en laboratorio que más se asemeja a la compactación de campo. También se pueden evaluar especímenes extraídos del pavimento en el ensayo de pista. Las dimensiones de los especímenes pueden ser de 10 cm o 15 cm de diámetro y un espesor fijo de 5 cm.

❖ Acondicionamiento de la temperatura de ensayo.

Para el ensayo de pista UMICH, las condiciones de temperatura deben mantenerse constantes durante toda la prueba, por lo que previo a la ejecución del ensayo se enciende la cámara de aislamiento de la máquina de pista y es calibrada a 60°C., por su parte el espécimen es introducido en un horno a 60°C durante 2 hrs.

Posteriormente, es extraído el espécimen del horno e introducido en la cámara de aislamiento, el ensayo se inicia hasta que el conjunto haya alcanzado nuevamente los 60°C.

❖ Ejecución del ensayo.

Una vez terminado el proceso de precalentamiento, se colocan las probetas dentro de un molde prismático de 30 por 30 cm., el cual es fijado al carro de desplazamiento mediante unos ángulos provistos para este fin, evitando que la llanta tenga contacto con las probetas; se deja cerrada la cámara hasta homogeneizar nuevamente la temperatura. Transcurrido el tiempo, se apoya la rueda sobre las probetas y con la carga especificada, se pone en marcha el carro durante tres pasadas completas para lograr un perfecto asentamiento de la rueda con las probetas, se pone el micrómetro

en ceros y tras 5 minutos se inicia el ensayo durante un tiempo de 120 minutos sin interrupciones o hasta que alcance la deformación máxima permitida.

Se deben de medir las deformaciones acumuladas en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del inicio 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.

5.6.- Resultados Obtenidos con los Ensayos.

Los resultados de las deformaciones plásticas se tienen en función del tiempo, evaluándose con ellos la rapidez con la que la mezcla asfáltica se deforma y la magnitud de la deformación plástica originada por los dos tipos de carga o eje equivalente, 8,2 y 13,0 toneladas.

Ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones registradas, los cuales se pasan a un gráfico deformación-tiempo y se dibuja la curva de deformación de la mezcla. A partir de las deformaciones, determinadas en el gráfico, correspondientes a los tiempos del ensayo, se calcula la velocidad de deformación, mediante la fórmula:

$$V_{t2/t1} = \frac{d_{t2} - d_{t1}}{t_2 - t_1}$$

La velocidad, de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t2/t1, parámetro que vendrá expresado en 10⁻³ mm/min.

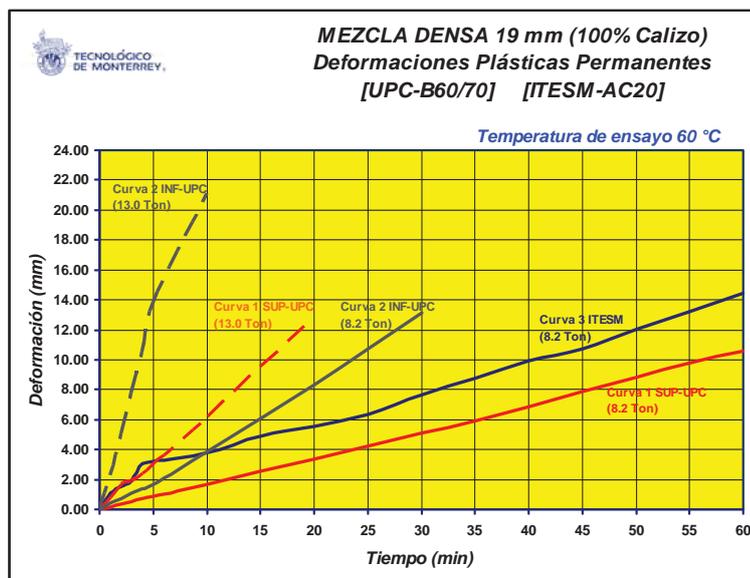
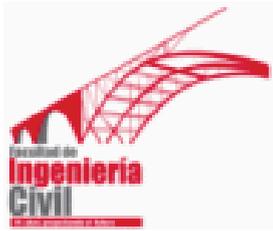


Figura 5.13 Ejemplo de grafico deformación tiempo obtenido del ensayo de ITESM Wheel Tracking.
 (fuente: Pérez J. F. 2005).



Capítulo 6.

Pruebas de Laboratorio.

6.1.- Parámetros a Seguir en la Investigación.

Como se ha mencionado en este trabajo, las deformaciones plásticas o roderas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente 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 de pavimentos asfálticos que más preocupan dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas.

La deformación plástica permanente, se caracteriza principalmente por una sección transversal de la superficie del pavimento que ya no se encuentra en su posición original de diseño, se le llama permanente, porque como ya lo hemos dicho representa la acumulación de pequeñas deformaciones que ocurren cada vez que se aplica una carga y que resultan irrecuperables para el pavimento.

Actualmente en México, la construcción de pavimentos asfálticos y su resistencia, se ve afectada en gran medida por las deformaciones plásticas permanentes que ocurren en la capa superficial del pavimento (también llamada capa de rodadura). Este defecto está íntimamente relacionado con el método empleado en el diseño de las mezclas asfálticas (el cual es fundamental para garantizar el funcionamiento correcto durante la vida útil de un pavimento asfáltico), también los gradientes de temperatura medioambiental, las cargas por eje equivalente, la calidad de los materiales con los

cuales se fabrican las mezclas asfálticas (agregados pétreos y asfaltos), el contenido de asfalto en las mezclas y podemos mencionar además, que en la etapa de construcción de los pavimentos asfálticos, afecta en gran medida la temperatura de las mezclas así como su compactación.

De las variables de influencia en la formación de las deformaciones plásticas descritas en el párrafo anterior, una de ellas es el tema central y propósito de esta investigación. Se seleccionó analizar el tipo de asfalto, a distintas temperaturas de ensayo, como variables, mediante el ensayo de pista, debido a que esta prueba evalúa de forma muy aceptable la susceptibilidad de las mezclas asfálticas ante la formación de roderas; otro de los objetivos planteados en la investigación fue el de comprobar los resultados de las caracterizaciones reológicas descritas en el capítulo 4, con los resultados del ensayo de pista, y de esta forma comprobar la confiabilidad de estos estudios reológicos.

A continuación se listaran cada uno de los parámetros definidos como fijos, presentes en cada espécimen fabricado de mezcla asfáltica.

1. Se empleó el mismo tipo de agregado pétreo para la fabricación de las probetas, proveniente de un banco de la región de Guadalajara, Jalisco.
2. La granulometría seleccionada es la establecida por la norma mexicana N-CMT-4-04-002/02 para carpetas asfálticas de granulometría densa, para una intensidad de tránsito menor o igual de un millón de ejes equivalentes, con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm y ajustada al límite superior. Se consideró esta granulometría por considerarla la más susceptible ante las deformaciones, debido al bajo contenido de agregado grueso.
3. El contenido de asfalto es de 8.5 % sobre el peso del agregado, este fue definido con base al método Marshall. Con este contenido de asfalto se garantiza una baja estabilidad y por lo tanto una deformación mayor en los especímenes.
4. El mezclado se llevó a cabo por medio de un equipo mecánico.
5. La compactación de las probetas se hizo con el compactador giratorio empleado por el método SUPERPAVE, con un ángulo de giro de 1.25°, una presión de 600 kPa y un número de giros igual a 28.
6. Se selecciono el número de giros igual a 28 con el fin de establecer un contenido de vacíos del 10 % en la probeta compactada, para así asegurar una alta deformación en los especímenes al no contar con una estructura granular bien formada.
7. En lo referente al ensayo de pista, se establece una frecuencia de aplicación de carga de 42 pasadas/ minuto, con una presión de contacto de 9 Kg/cm² para una carga por Eje Equivalente de 13,0 Toneladas.

Ahora mencionaremos los parámetros a evaluar mediante esta investigación, estos parámetros son conocidos como variables.

1. Tipo de asfalto, se emplearan cinco tipos de asfaltos para la fabricación de las mezclas a estudiar, los asfaltos fueron descritos en el capítulo 4.
2. Temperatura de ensayo, la normativa española establece para la pista de ensayo una temperatura de prueba de 60° C, en esta investigación se adicionaron la temperatura PG obtenida por el método SUPERPAVE y la temperatura de falla mas 3° C. Las dos fueron analizadas en el capítulo 4.

Como se puede observar, los parámetros fijos descritos anteriormente fueron seleccionados para provocar en las mezclas, las condiciones más desfavorables, ante la formación de roderas, mediante la maquina de pista, esto fue con el propósito de evaluar de forma más directa el aporte que cada asfalto proporciona a las mezclas. Los parámetros definidos como variables fueron seleccionados con el mismo propósito de evaluar su aporte ante la formación de roderas, además de comprobar si los resultados de las pruebas reológicas de los asfaltos, son confiables al predecir el comportamiento de las mezclas, ante las deformaciones permanentes.

6.2.- Caracterización de Materiales.

En la construcción de cualquier pavimento asfáltico, existe una regla que no ha cambiado a través de su historia; la cual dice: un pavimento asfáltico es tan bueno como los materiales y calidad del proceso constructivo. En los párrafos siguientes nos ocuparemos de la calidad de los materiales y de las pruebas que se utilizaron para evaluar esta característica.

Como se ha mencionado anteriormente una mezcla asfáltica está compuesta por dos materiales principales: asfalto y agregado pétreo. Nos enfocaremos en las pruebas y procedimientos para evaluar, la calidad de estos, tomando como parámetros las normas y especificaciones elaboradas, principalmente por las de la SCT. Cabe mencionar que la caracterización de materiales fue llevada a cabo en la empresa SURFAX S.A. de Guadalajara, Jalisco. Las pruebas al agregado pétreo se realizaron en su laboratorio de mezclas y las del asfalto en su laboratorio de asfaltos.

6.2.1.- Agregados Pétreos.

Muestreo.

Como ya se mencionó el material pétreo usado es proveniente de un banco de la región de Guadalajara, Jalisco, el cual es un material Basáltico triturado. Para la toma de las muestras se

procedió a remover el material ubicado en la parte superior de los montículos, y una vez que se observó que el material estaba limpio y homogéneo se procedió al llenado de los costales, asegurándose de tener la cantidad necesaria para la fabricación del número de especímenes requeridos, que posteriormente se trasladaron al Laboratorio de Mezclas de la empresa Surfax.



Figura 6.1 Vista del banco de material triturado de la región de Guadalajara, Jalisco.

Granulometría.

Como ya se había seleccionado la granulometría a emplear previamente, este proceso consistió únicamente en tamizar el material para separarlo en las fracciones a emplear (1/2", 3/8", 1/4", 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 y charola), y así obtener la cantidad requerida para elaborar el número de probetas determinado. El proceso de cribado se realizó en forma mecánica para las arenas y finos y de manera manual para las gravas.



Figura 6.2 Equipos empleados para obtener la granulometría del material.

Densidad Relativa

La prueba de densidad relativa se realizó con el fin de conocer la masa de los sólidos por unidad de volumen; se determinó, tan solo para el agregado grueso (gravas), todo con respecto a la densidad del agua.

Para el caso del material grueso (retenido en la malla 3/8"), el procedimiento con el que se obtuvo fue, primero se tomó una muestra de 500 grs. y se saturó en agua durante 24 hrs.

Pasado este tiempo se seca superficialmente de manera rápida; y en un picnómetro (Figura 6.3), lleno con agua destilada colocamos la muestra; recolectando el agua desalojada por este en una probeta graduada, de la cual tomamos el volumen de agua desalojada en cm^3 (V_f).



Figura 6.3 Picnómetro para determinación de densidad de gravas.

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

Se realizaron tres pruebas de cada material, de las cuales se obtuvo un promedio para cada uno. La densidad para arenas se obtuvo mediante la fórmula:

$$D_{rsf} = \frac{P_s}{P_s + P_1 - P_2} \quad (6.1)$$

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

$$D_{rg} = \frac{P_i}{V_t \cdot (D_w)} \quad (6.2)$$

Equivalente de arena.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\% EA = \frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} \times 100 \quad (6.3)$$



Figura 6.4 Equipo para la obtención del equivalente de arena.

Partículas alargadas y lajeadas.

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

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

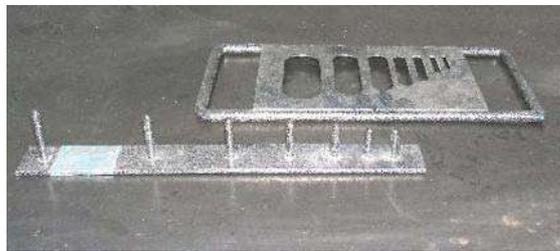


Figura 6.5 Calibrador para partículas alargadas y lajeadas.

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

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

$$C_a = \frac{m_a}{M} \times 100 \quad (6.4)$$

$$C_p = \frac{m_e}{M} \times 100 \quad (6.5)$$

Desgaste de los Ángeles.

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

Para lo cual colocamos una muestra del tipo C (de acuerdo a la normativa descrita en el manual M-MMP-4-04-006/02), dentro de la Máquina de los Ángeles (2500 grs. del material comprendido entre las mallas $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{8}$ ", y otros 2500 grs. del material comprendido entre las mallas $\frac{1}{4}$ " a No. 4.(P))

Dentro de la máquina también colocamos 8 esferas como carga abrasiva con una masa de aproximadamente 3330 grs.

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

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

El % de desgaste se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$P_a = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (6.6)$$

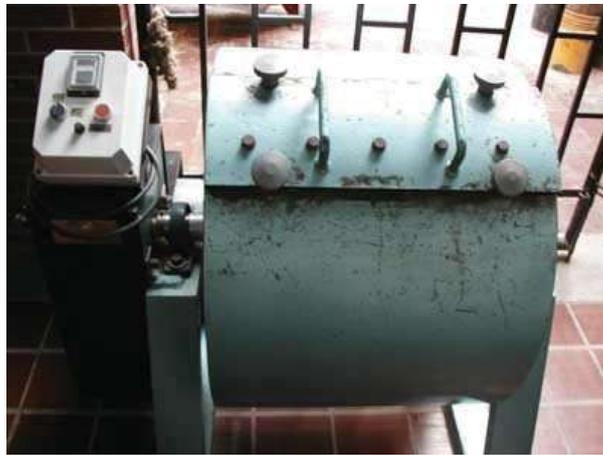


Figura 6.6 Máquina de los Ángeles.

6.2.2.- Asfaltos.

Penetración a 25°C.

Esta prueba consiste en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25° C en un baño de agua con temperatura controlada. Posteriormente, se coloca una aguja de dimensiones determinadas se coloca sobre la superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y por un tiempo exacto de 5 segundos. La distancia que la aguja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 mm y esta cantidad es llamada la penetración de la muestra.



Figura 6.7 Equipo para realizar la prueba de penetración en el asfalto.

Punto de Reblandecimiento.

Por medio de esta prueba se puede estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

El proceso de la prueba se ensambla el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba, las guías y el termómetro. Se llena el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm, con agua potable a 5° C si el punto de reblandecimiento esperado es menor de 80° C o glicerina a 30° C si es mayor, con las pinzas se colocan las esferas en el fondo del vaso. Se coloca el conjunto en el vaso dejándolo reposar hasta mantener estable la temperatura requerida.

Posteriormente se saca el conjunto del vaso y se colocan las esferas con las pinzas en las guías, inmediatamente se vuelve a introducir el conjunto en el vaso, colocándolo en la parrilla e incrementando la temperatura de forma gradual a razón de 5° C/min, se toman lecturas cada minuto después de transcurridos los 3 primeros minutos. Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior de soporte. Finalmente se registra como punto de reblandecimiento el promedio de las lecturas tomadas.

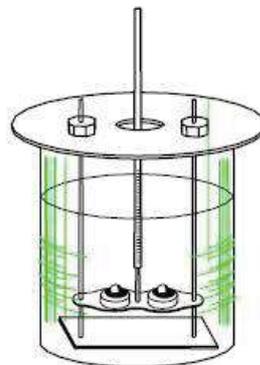


Figura 6.8 Esquema del equipo para encontrar el punto de reblandecimiento.

Recuperación Elástica por Torsión a 25°C.

Con esta prueba podemos determinar la capacidad de recuperación elástica de los materiales asfálticos modificados. La prueba consiste en inducir una deformación angular por medio de un cilindro de acero, embebido en una muestra de asfalto, con la finalidad de observar su capacidad de recuperación.

En un molde se vacía el cemento asfáltico a una temperatura a la que este presente fluidez, anterior a este paso el molde se encontrará bien ubicado dentro de el cilindro metálico, se vierte el asfalto usando como referencia la marca de grabado del cilindro, se deja enfriar el conjunto por lo menos 90 minutos como mínimo, hasta que alcance la temperatura ambiente.

Se introduce el conjunto en un baño de agua a una temperatura de 25° C, durante 90 minutos para equilibrar la temperatura del agua y de la muestra; posteriormente se gira el cilindro 180° en el sentido de las manecillas del reloj en un tiempo de 3 a 5 segundos. Transcurridos 30 minutos se registra la lectura indicada por la barra sobre la semi-corona graduada, como el valor del ángulo recuperado. Se reporta como resultado de la prueba, el porcentaje de recuperación con respecto al ángulo inicial de 180°, con la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{L}{180} \times 100 \quad (6.7)$$

Donde:

Re= Recuperación elástica por torsión. (%)

L= Ángulo recuperado. (°)



Figura 6.9 Equipo para encontrar la recuperación elástica por torsión.

Ductilidad a 4°C.

La ductilidad es la medida de cuanto puede ser estirada una muestra antes de romperse en dos. Esta es medida mediante una prueba de extensión, en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y temperatura especificadas. El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompa. Registrándose la longitud del hilo del material en el momento del corte en centímetros y se denomina la ductilidad de la muestra.



Figura 6.10 Equipo para realizar la prueba de ductilidad.

6.3.- Fabricación de Probetas.

Como se mencionó anteriormente en este capítulo los parámetros a seguir en la investigación, fueron fijados desde la planeación de las pruebas, por lo que con estos datos definidos se comenzó la elaboración de los especímenes a probar en la Pista de Ensayo UMICH. La temperatura de mezclado y compactación fue obtenida mediante el Viscosímetro Rotacional, por medio de la carta de viscosidad.

Para la fabricación de las probetas SUPERPAVE (150 mm de diámetro) se emplearon aproximadamente 2200 g de material pétreo, lo que resulta en probetas con una altura de 60 ± 3 mm, altura requerida para realizar el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente en la Pista de Ensayo UMICH.

El mezclado se realizó por medio de una mezcladora mecánica y la compactación se realizó por medio de compactador giratorio SHRP, la densidad de la mezcla se obtuvo por la norma AASHTO T 209 y finalmente las probetas fueron cortadas a una altura de 5 cm, para poder ser ensayadas en la maquina de pista. A continuación se describe de una forma más detallada este proceso.

Calentamiento del asfalto y agregados.

Para poder realizar el mezclado del asfalto y el pétreo, estos tienen que estar a temperaturas altas para lograr su correcto mezclado y un envolvimiento adecuado del agregado por parte del asfalto. La temperatura de mezclado del asfalto fue de 155° C para el asfalto convencional y 165° C para los asfaltos modificados, para comenzar el mezclado se dejaba calentando el asfalto a la temperatura señalada dependiendo de su tipo, por lo menos dos horas antes de comenzar esta operación, para asegurar de que todo el asfalto se homogenizara a esta temperatura; por su parte el agregado se calentó a una temperatura de 110° C para garantizar que estuviera lo más seco posible y poder ser bien cubierto por el asfalto, este era colocado en el horno al mismo tiempo que el asfalto.



Figura 6.11 Horno para calentar el agregado y el asfalto.

Mezclado.

A estar a la temperatura requerida el asfalto, se iniciaba con el mezclado, con el proceso siguiente: se retiraban del horno una charola con 990 gramos de agregado de los distintos tamaños requerido a excepción del filler, el agregado se vierte en una charola especial para el mezclado y posteriormente es adicionado el asfalto en una cantidad de 8.5 % sobre el peso del agregado.

Posterior a el vaciado de los componentes de la mezcla en la charola, esta es colocada en el mezclador mecánico, donde se somete al mezclado por medio de una paleta de aluminio, por un tiempo de 1 minuto, al finalizar este se detiene el mezclador y se le adiciona el filler a la mezcla y

esta se agita manualmente con una espátula, para después accionar el mezclador por 3 minutos mas y se repite la operación anterior con excepción de la adición del filler, por último se enciende el mezclador una vez más durante 2 minutos. Se retira el molde del mezclador y se vierte la mezcla nuevamente un una charola se le etiqueta y se repite el proceso nuevamente desde el primer paso para llegar a juntar dos charolas necesarias para fabricar un espécimen de 2200 gramos. Se mantiene un tiempo de 15 minutos de mezclado entre cada material para producir una probeta.



Figura 6.12 Mezclador mecánico.

Compactación.

Previo al proceso de compactación se deja calentar la mezcla por dos horas para tratar de simular el efecto producido en el transcurso de la planta de fabricación al lugar de compactación en campo. El molde del compactador giratorio también es calentado previamente a una temperatura de 110 ° C; al transcurrir estos tiempos son sacadas del horno dos charolas requeridas para producir un espécimen de 15 cm de diámetro por 6 cm de espesor.



Figura 6.13 Calentamiento del agregado antes de la compactación.

Se coloca en el molde un papel filtro especial para evitar que se pegue la mezcla a este, se vierten las dos charolas en el molde del compactador y es colocado otro papel encima de la mezcla, se introduce el molde con la mezcla en el interior del compactador y se ajusta por medio de una palanca manualmente el ángulo de de giro a 1.25° , al ajustar el ángulo se da inicio a la compactación registrando una serie de datos de forma constante en una computadora, en todo el proceso de compactación, al finalizar el número de giros especificado en el software, en nuestro caso es de 28 giros, es retirado el espécimen compactado del molde y etiquetado. Este proceso se repite hasta obtener el número de probetas definido.



Figura 6.14 Compactador giratorio SHRP.

Obtención de la gravedad específica total de las probetas (densidad).

Después de la compactación se dejan enfriar las probetas hasta alcanzar la temperatura ambiente, para posteriormente obtener su gravedad específica, existen diferentes métodos normalizados para este propósito en nuestro caso se utilizó la norma AASHTO T 209, que nos indica, el procedimiento comúnmente usado para determinar la gravedad específica total de un espécimen compactado, es el basado en el principio de Arquímedes. El volumen del espécimen se calcula a partir de su masa (1) en un baño con agua y (2) fuera del baño con agua. La diferencia en masas se utiliza después para calcular la masa del agua desplazada, la cual se convierte a volumen usando la gravedad específica del agua. El volumen del espécimen se determina por medio de la masa del espécimen saturado y superficialmente seco.

La expresión para la gravedad específica es la siguiente:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (6.8)$$

Donde:

A = masa del espécimen al aire.

B = masa del espécimen saturado, y superficialmente seco.

C = masa del espécimen sumergido en agua.



Figura 6.15 Determinación de la gravedad específica total.

Gravedad específica máxima teórica.

La gravedad específica máxima teórica se determina tomando una muestra secada en el horno en condición suelta (condición contraria a la compactada), pesándola y luego sumergiéndola completamente en un baño con agua a 25 °C.

Después se aplica un vacío durante 15 minutos para retirar el aire atrapado. El volumen de la muestra se calcula restando la masa en el agua de la masa seca. Es importante señalar que la gravedad específica máxima teórica y la gravedad específica total de la mezcla asfáltica debe medirse en laboratorio con la mayor precisión, pues un error pequeño en cualquiera de estos dos

parámetros, se reflejará en un error significativo en el cálculo de los parámetros volumétricos, lo cual podría no ser descubierto.

$$G_{mm} = \frac{G}{G + H - I} \quad (6.9)$$

Donde:

G = masa de la mezcla asfáltica (estado suelto)

H = masa del picnómetro + agua

I = masa del picnómetro + mezcla + agua



Figura 6.16 Determinación de la gravedad específica teórica máxima.

6.4.- Pruebas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Previo a realizar el ensayo de pista, fue necesario cortar las probetas para llegar a un espesor final de 5 cm, ya que es el que especifica la normativa española (NLT 173/84 "Resistencia a la Deformación Plástica de Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio"), recordando que las probetas elaboradas tienen aproximadamente una altura de 6 cm. Para realizar esta operación fue necesaria la adquisición de una cortadora de disco de diamante especial para cortar mezclas asfálticas.

Una vez realizado lo anterior, la evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente, se realizó mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH. (Figura 6.17)



Figura 6.17 Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.

Antes de comenzar con el ensayo se enciende el control de temperatura de la máquina de pista y se selecciona a la temperatura deseada de ensayo, por lo general la máquina dura dos horas para establecerse en una temperatura fija, debido a que el termopar del interior de la cámara presenta una respuesta muy lenta ante los cambios de temperatura del interior.

Como se mencionó en el capítulo 5, las probetas antes de ser ensayadas se colocan en un horno a la temperatura que se efectuara el ensayo por un tiempo de 2 horas.

Una vez transcurrido el tiempo mencionado, se introduce el molde con las dos probetas a ensayar (en el caso de especímenes de 10 cm de diámetro, se ensayan 3 probetas), en el interior de la cámara se ajustan los pernos de sujeción que mantienen fijo el molde al carro de desplazamiento de la máquina, se cierra nuevamente la cámara y se deja transcurrir mas o menos un tiempo de 30 minutos, para que la temperatura en el interior de la cámara se regule de nueva cuenta.

Con la temperatura regulada se abre la ventana y se coloca la rueda sobre los especímenes y se acciona, el mecanismo de movimiento dejando que la rueda pase en tres ocasiones por las probetas, para garantizar que esta se asiente en toda la superficie de su recorrido. Posterior a esto se coloca el micrómetro en ceros y se inicia el ensayo; habrá que tener especial cuidado en verificar que el número de pasadas sea el especificado (42 pasadas/minuto) y la temperatura sea la seleccionada. Verificado esto, se comienzan a tomar las lecturas de deformación a los minutos 3, 5, 10, 15, de 5 en 5 hasta 45 y después de ahí de 15 en 15 hasta los 120 minutos que finaliza el ensayo.

Para el caso especial de nuestra investigación además de la temperatura estándar de 60° C, del ensayo, se seleccionaron dos temperaturas más que son: la del grado PG del asfalto en estudio, obtenido por medio del método SUPERPAVE; y la temperatura de falla mas 3° C, obtenida con el mismo método.



Figura 6.18 Probeta ensayada a una temperatura de 60° C.



Figura 6.19 Probeta ensayada a una temperatura de grado PG (76° C).



Figura 6.20 Probeta ensayada a una temperatura de falla + 3°C (82° C).



Capítulo 7.

Resultados de las pruebas.

Con base en la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, para pavimentos flexibles, partiremos analizando los materiales utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densas.

7.1.- Propiedades Físicas del Agregado Pétreo.

En el caso de los agregados pétreos, se tiene que verificar que los agregados cumplan con lo que marca la normativa SCT (*N-CTM-4-04-02 "Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas"*).

Tabla 7.1 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa para $ESALs \leq 10^6$ (SCT).

Parámetro	Valor (Norma)	Valor (Laboratorio)
Densidad (agregado grueso), mínimo	2.4	2.7
Desgaste de los Ángeles; %, máximo	30	13.1
Partículas alargadas; %, máximo	35	13.8
Equivalente de arena; %, mínimo	50	68
Partículas lajeadas, %, máximo	35	18.1
Partículas trituradas, %	No especificado	92.5
Absorción (agregado grueso), gr/cm^3	No especificado	1.9

Como se puede observar en la tabla 7.1 el agregado cumple adecuadamente con todas las especificaciones dictadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la curva granulométrica se ajustó para que pasara por el límite superior, marcado por la norma SCT. Tabla 7.2 y Figura 7.1.

Tabla 7.2 Granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa 12.5 mm (SCT).

Abertura (mm)	Malla	Densa 12.5 mm	
		Límite inferior % Que pasa	Límite superior % Que pasa
12.5	1/2"	100	100
9.5	3/8"	90	100
6.3	1/4"	76	89
4.7	No. 4	68	82
2.0	No. 10	48	64
0.85	No. 20	33	49
0.425	No. 40	23	37
0.25	No. 60	17	29
0.15	No. 100	12	21
0.075	No. 200	7	10

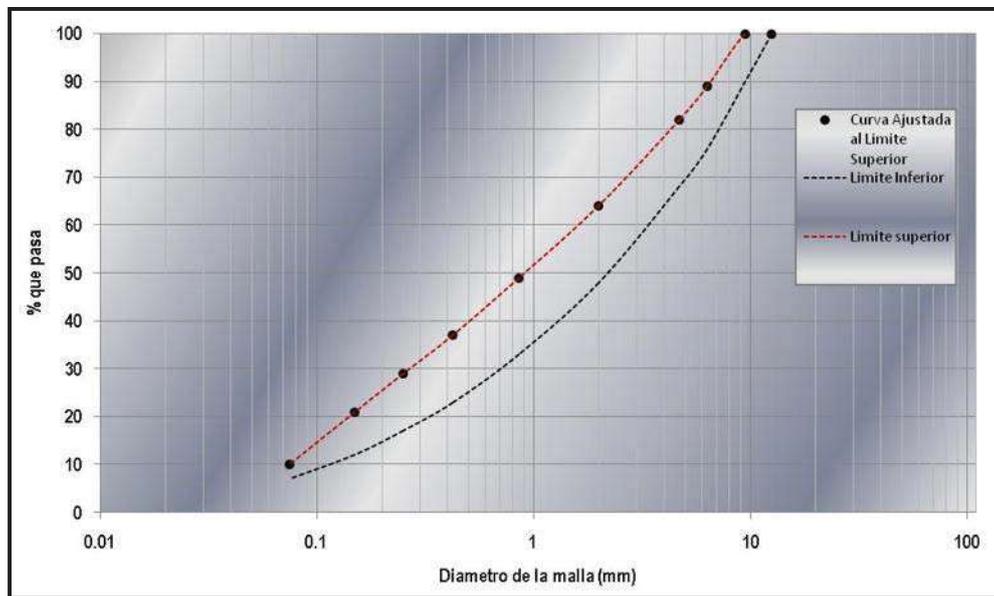


Figura 7.1 Curva granulométrica ajustada al límite superior (12.5 mm).

7.2.- Propiedades Físicas de los Asfaltos Empleados.

La caracterización de los asfaltos empleados como ya fue mencionado fue llevada a cabo por personal de la empresa Surfax. En la tabla 7.3 se enlistan las pruebas que se le realizaron a los asfaltos así como la norma a la que se refieren.

Tabla 7.3 Pruebas y designaciones para evaluar los cemento asfálticos.

Prueba	Designación
Penetración a 25°C	M-MMP-4-05-006/00 SCT
Penetración a 4°C	M-MMP-4-05-006/00 SCT
Punto de Reblandecimiento	M-MMP-4-05-009/00 SCT
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C	M-MMP-4-05-024/02 SCT
Recuperación Elástica por Ductilometro a 25°C	D 6084-97 ASTM
Ductilidad a 4°C	M-MMP-4-05-011/00 SCT
Resiliencia a 25°C	M-MMP-4-05-023/02 SCT
Viscosidad Brookfield a 135°C	M-MMP-4-05-005/02 SCT
Separación en Asfalto Modificado por Anillo y Esfera	M-MMP-4-05-022/02 SCT
Pruebas al Residuo de la Película Delgada en RTFO	M-MMP-4-05-010/02 SCT

Tabla 7.4 Características del cemento asfáltico.

Prueba	AC-20 Salamanca	Elvaloy	SBS	Oxidado	E.V.A.
Penetración a 25°C (1/10mm)	45	42	65	34	57
Penetración a 4°C (1/10mm)	24	20	24	18	22
Reblandecimiento (°C)	50	65	56	58	56
Rec Elástica por Torsión 25°C (%)	9	50	60	13	20
Rec. Elástica por Ductilometro 25°C (%)	20	82	83	33	45
Ductilidad a 4°C (cm)	----	5	17	----	6
Resiliencia a 25°C (%)	7	27	22	12	15.5
Viscosidad Brookfield 135°C (cps)	424	1637	917	288	698
Separación por Anillo y Esfera (°C)	N.A.	1	0	NA	2
Perdida de masa por calentamiento (%)	0.36	0.61	0.78	0.39	0.41
Penetración a 25°C (1/10mm)	24	26	30	18	25
Penetración a 4°C (1/10mm)	14	14	15	11	14
Reblandecimiento (°C)	59	74	66	66	64
Rec Elástica por Ductilometro 25°C (%)	33	79	82	38	44
Ductilidad a 4°C (cm)	----	----	----	----	----
Resiliencia a 25°C (%)	20	23	29	24	22
Viscosidad Brookfield 135°C (cps)	735	3673	1733	588	1342

Los resultados del análisis demuestran las diferencias existentes entre las muestras de los asfaltos modificados, principalmente en las recuperaciones elásticas, por torsión y ductilómetro. Los asfaltos modificados con polímeros elastoméricos como Elvaloy y los tipo SBS presentan recuperaciones elásticas altas, a diferencia del asfalto oxidado con ácido polifosfórico y plastómero tipo E.V.A., estos

presentan recuperaciones elásticas bajas. Sin embargo en otros resultados como el punto de reblandecimiento presentan valores similares. Otra diferencia notable se encuentra en la viscosidad Brookfield , los valores mas altos representan una mayor resistencia al flujo, este es un factor importante para estimar la resistencia ante la deformación permanente.

A continuación en la tabla 7.5 se presentan los resultados obtenidos de la carta de viscosidad, de donde se obtuvieron las temperaturas de mezclado y compactación de los asfaltos empleados.

Tabla 7.5 Temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas fabricadas.

Tipo de asfalto	Temperatura	
	Mezclado, ° C	Compactación, ° C
Virgen (AC-20)	155	145
Modificados (Elvaloy, SB o SBS, EVA y oxidado)	165	155

7.3.- Pruebas en la Pista de Ensayo UMICH.

En esta investigación se fabricaron 2 probetas por cada tipo de asfalto y 2 para ensayar a cada temperatura, como vamos a ensayar 5 tipos de asfaltos y 3 temperaturas; en total se fabricaron 30 probetas con un contenido de asfalto de 8.5 % sobre el peso del agregado cada una y un contenido de vacios de 10 %.

Tabla 7.6 Propiedades volumétricas de los especímenes fabricados.

Asfalto	Probetas elaboradas	Densidad (promedio)	Vacios (promedio)
AC-20	6	2.071	10.6
Elvaloy	6	2.054	9.6
EVA	6	2.083	9.2
Oxidado	6	2.079	9.4
SBS	6	2.082	9.3

Como ya se había mencionado anteriormente el Ensayo de la Máquina de Pista se evaluará mediante la Normativa Española, que es mas estricta que la normativa mexicana, debido a 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 de 13 toneladas.

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

Resultados del Ensayo de Pista para la mezcla asfáltica en caliente elaborada con la granulometría de la curva ajustada al límite superior, densa 12.5 mm y con 5 tipos de asfaltos, uno convencional AC-20 y 4 asfaltos modificados de características diferentes, con una carga por Eje Equivalente de 13 Toneladas o presión de contacto de $9 \pm 0.25 \text{ kgf/cm}^2$.

7.3.1.- Pruebas a 60° C.

Se realizaron las pruebas a esta temperatura, debido a que es la que marca la normativa española, en la cual se cita textualmente: "La temperatura normalizada para el ensayo será de $(60 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. No obstante, pueden utilizarse otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran". Convencionalmente, esta temperatura representa, normalmente, la temperatura mas caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.

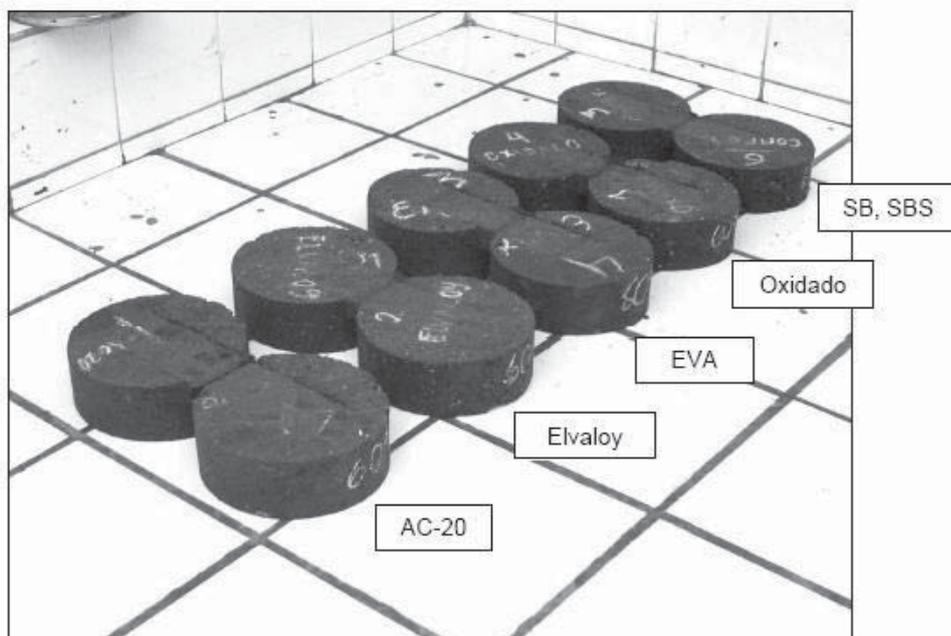


Figura 7.2 Especímenes ensayados a 60° C en la máquina de pista.

Tabla 7.7 Deformaciones plásticas permanentes máximas.

Mezcla asfáltica	Deformación (mm)
Salamanca AC-20	4.50
Modificado Elvaloy	1.55
Modificado SBS	2.11
Modificado EVA	3.23
Modificado Oxidado	3.64

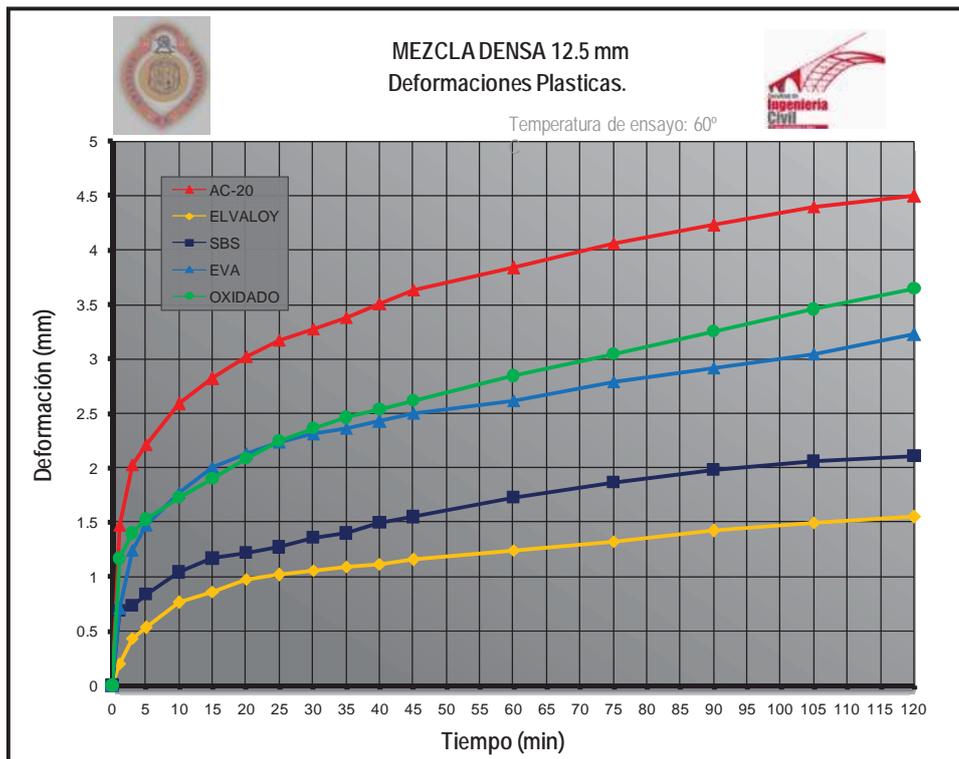


Figura 7.3 Gráfico deformación-tiempo.

En la figura 7.2 podemos observar la huella que se genera al paso de la rueda de la maquina de pista, efecto que simula paso de los neumáticos de los autos en los pavimentos; la deformación plástica no es tan evidente en la imagen para esta temperatura de ensayo.

En la tabla 7.7 se encuentran las deformaciones máximas registradas para cada tipo de mezcla, tal y como la tabla nos lo indica la mezcla fabricada con asfalto convencional AC- 20, el la que presenta el mayor valor de deformación al final del ensayo, esto lo podemos verificar en la figura 7.3 donde se encuentra el gráfico deformación vs tiempo, en el cual las gráficas nos dan una idea mas clara de la deformación que sufren las mezclas en el transcurso de toda la prueba. De las imágenes anteriores

podemos deducir que para una prueba en la pista de ensayo a una temperatura de 60° C, las condiciones que presentaron las mezclas son aceptables. Con esta información podemos clasificar el comportamiento de las mezclas iniciando con las mas susceptibles a las deformaciones plásticas; quedando en el siguiente orden, AC-20, Oxidado, EVA, SBS y Elvaloy.

Tabla 7.8 Velocidades de deformación para cada intervalo a 60° C.

Mezcla asfáltica	velocidad de deformación (mm/h)		
	V _{30/45}	V _{75/90}	V _{105/120}
Salamanca AC-20	1.42	0.66	0.41
Modificado Elvaloy	0.41	0.41	0.20
Modificado SBS	0.76	0.46	0.20
Modificado EVA	0.76	0.51	0.71
Modificado Oxidado	1.63	0.81	0.76

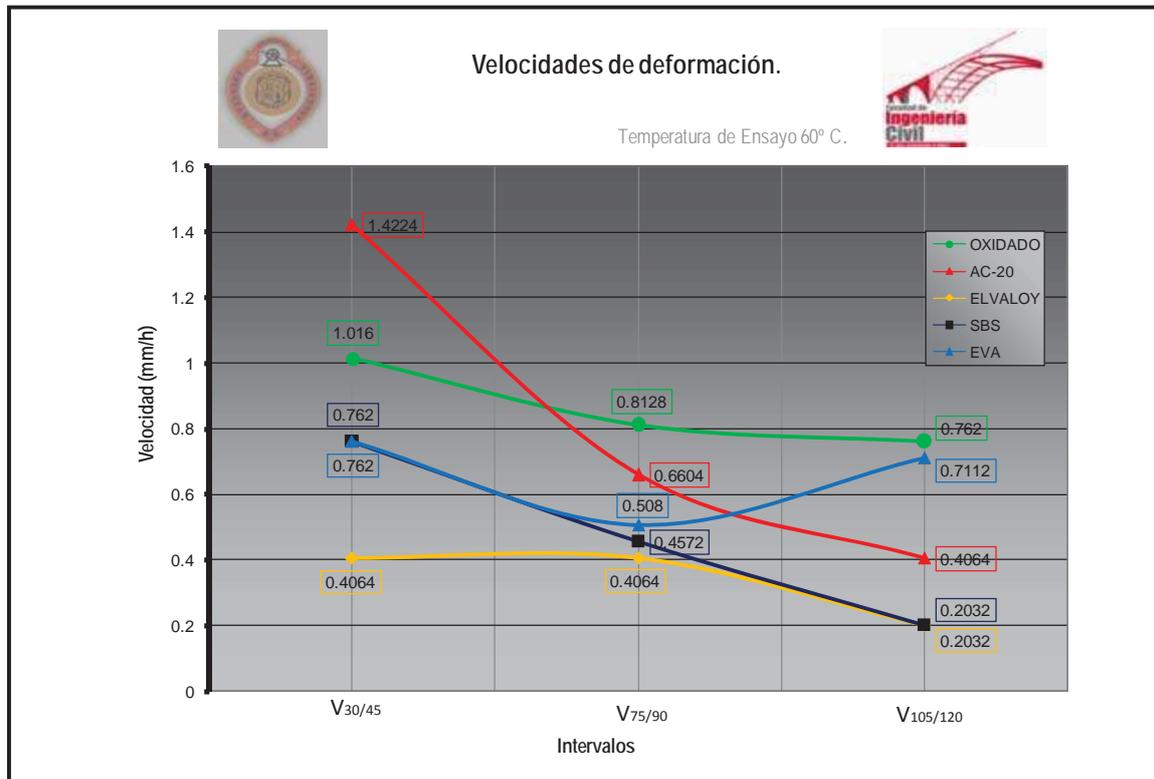


Figura 7.4 Gráfico velocidad de deformación-intervalos de velocidad de deformación a 60 °C.

En la tabla 7.8 se encuentran los valores de velocidades de deformación para cada intervalo en estudio, en la figura 7.4, se ubica el gráfico de estos valores pero con forma de curvas; del comportamiento de las curvas podemos deducir, que para un ensayo a temperatura de 60°C las

velocidades de deformación con los mas altos valores se presentan al inicio de la prueba, disminuyendo de manera gradual en el transcurso de la prueba y llegando al final del ensayo a un valor aun mas bajo. Este comportamiento lo podemos explicar debido a que al inicio del ensayo, la mezcla posee un alto porcentaje de vacios (parámetro de la prueba), por lo que con la frecuencia de la carga las partículas de agregado en la mezcla se encuentran en un proceso de acomodo, llenando con asfalto los vacios expulsados dentro de la mezcla, al llegar el momento en el que el asfalto llena la mayoría de los vacios, es este el ayuda a aglutinar el agregado y evitando la formación de un ahuellamiento mayor. De esta forma podemos evaluar el aporte que cada asfalto le proporciona a la mezcla ante este deterioro. Es importante señalar que para la normativa española el intervalo de velocidad de deformación de mayor importancia es V105/120, debido a que en este se considera que se ha llegado al mejor acomodó del agregado en la mezcla durante todo el ensayo; nosotros consideraremos este valor para evaluar, como se mencionó anteriormente, el aporte del asfalto ante la formación del ahuellamiento.

Considerando lo expresado en el párrafo anterior podemos definir el comportamiento de cada mezcla con los valores de mayor velocidad de deformación a las de valores menores, quedando de la siguiente forma: Oxidado, EVA, AC-20, SBS y Elvaloy.

Comparando los comportamientos de las mezclas tanto en valores de deformación como en velocidades de deformación, tenemos que en los dos los mejores comportamientos los presentaron las mezclas con Elvaloy, SBS seguidos de la mezcla de EVA. Las mezclas de AC-20 y Oxidado se alternan las posiciones comparando los dos comportamientos, sin embargo son las dos que presentaron los peores desempeños a la temperatura de 60°C, ahora solo se tendría que valorar que importa mas si un valor de deformación mayor o una velocidad mayor de deformación, para poder definir que mezcla presentó el mas bajo desempeño ante las deformaciones plásticas.

7.3.2.- Pruebas a Grado PG.

El método SUPERPAVE como se mencionó anteriormente, ha cambiado en forma drástica el diseño de mezclas asfálticas, desarrollando nuevos equipos y criterios de evaluación. Uno de los grandes aportes de esta metodología es el nuevo sistema de clasificación de ligantes asfálticos, grado PG (grado de desempeño), el cual se fundamenta en las propiedades reológicas del ligante asfáltico en sus diferentes etapas de envejecimiento, basándose principalmente en la determinación de parámetros que afectan la deformación, ante temperaturas elevadas.

Con lo expresado anteriormente se justifica la evaluación de las mezclas en la pista de ensayo, a la temperatura PG; esta se obtuvo con los criterios especificados por el método SUPERPAVE, los resultados que arrojaron fueron, para el asfalto convencional AC-20 una temperatura de 70° C y para todos los asfaltos modificados fue de 76° C.

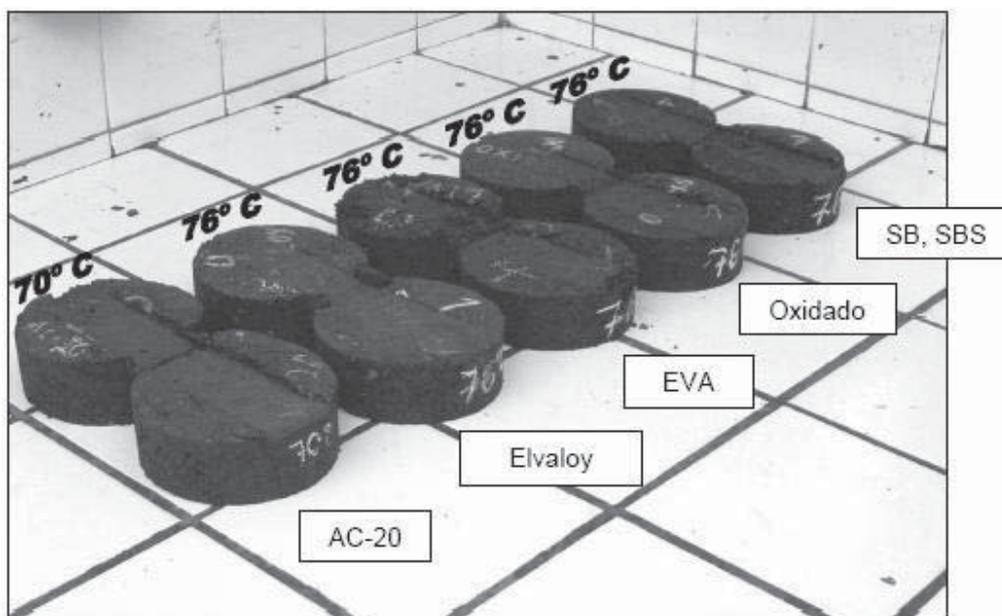


Figura 7.5 Especímenes ensayados a grado PG, en la máquina de pista.

En la fotografía mostrada en la figura 7.5 podemos observar el deterioro originado por la rueda de la pista de ensayo UMICH, en las mezclas asfálticas, elaboradas con distintos tipos de asfalto, de forma visual podemos observar e identificar cuales mezclas presentan mayor susceptibilidad ante las deformaciones plásticas.

Tabla 7.9 Deformaciones plásticas permanentes máximas.

Mezcla asfáltica	Deformación (mm)
Salamanca AC-20 (min. 75)	7.87
Modificado Elvaloy	4.60
Modificado SBS	5.28
Modificado EVA	8.13
Modificado Oxidado	4.34

En la tabla 7.9 se incluyen los valores máximos de deformación registrados al finalizar la prueba en la pista de ensayo a temperatura PG; la mezcla que presentó el máximo valor de deformación fue la elaborada con EVA, sin embargo es importante señalar que al realizar la prueba en la mezcla con AC-20, la máquina presentó una falla en el sistema de la unidad de control, debido a que la unidad de alimentación de presión de aire no tuvo la capacidad de satisfacer los requerimientos de presión de la máquina de pista, lo que se reflejo en la incapacidad de la rueda de realizar su recorrido por la

probeta que se ensayaba. Fue en el minuto 75 que se tomó la última lectura confiable, antes de la falla del sistema. A pesar de las continuas paradas de la rueda se continuó con el transcurso de la prueba hasta el minuto 90, sin embargo se eliminó esta lectura del estudio, debido a que no se consideraba confiable en los parámetros que evalúa la máquina de pista.

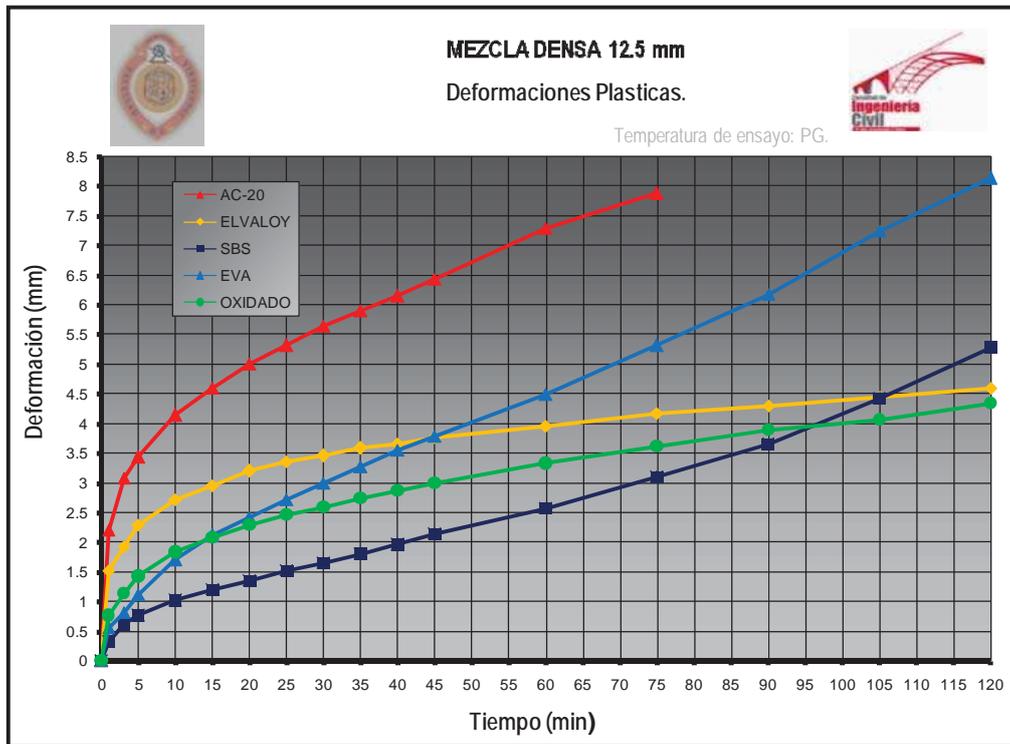


Figura 7.6 Gráfico deformación-tiempo.

Los Resultados de las pruebas efectuadas en las mezclas en la máquina de pista a temperatura PG, los podemos observar en la figura 7.6, en la cual es evidente que mezclas presentaron un mejor comportamiento ante la formación de las deformaciones plásticas.

Con los datos presentados hasta el momento, para evaluar los resultados a temperatura PG, evaluaremos las mezclas de la siguiente forma, con el parámetro que para esta investigación denominaremos como el comportamiento deformación-tiempo; las características a evaluar con este comportamiento son: valores de deformación máxima (tabla 7.9) y gráficas deformación-tiempo.

Partiendo de lo mencionado en el párrafo anterior podemos posicionar las mezclas de mayor a menor, en base a su susceptibilidad ante la deformación plástica, quedando de la siguiente forma: en primer lugar estaría la mezcla elaborada con AC-20, seguida de las mezclas con EVA, SBS, Elvaloy y Oxidado. Se considera la mas desfavorable a la mezcla AC-20 ya que se considera que de haber finalizado la prueba presentaría una deformación superior a la presentada por la mezcla EVA.

Tabla 7.10 Velocidades de deformación para cada intervalo a PG.

Mezcla asfáltica	Velocidad de deformación (mm/h)		
	V _{30/45}	V _{75/90}	V _{105/120}
Salamanca AC-20	3.15	0.00	0.00
Modificado Elvaloy	1.22	0.51	0.61
Modificado SBS	1.93	2.24	3.45
Modificado EVA	3.15	3.45	3.56
Modificado Oxidado	1.63	1.12	1.12

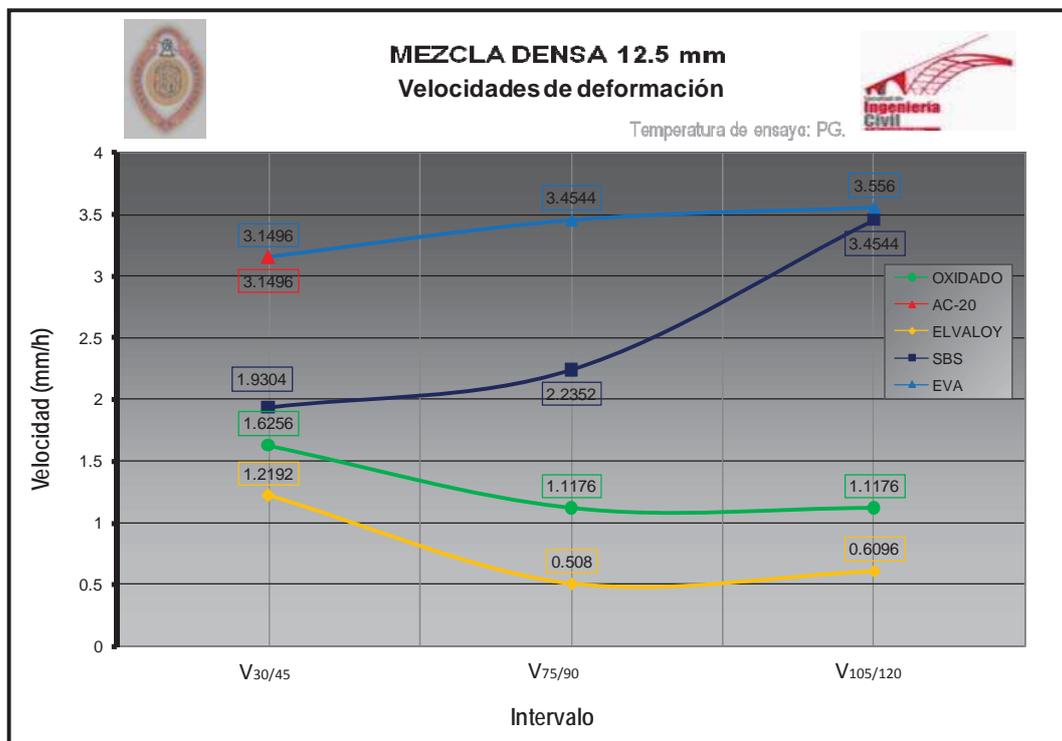


Figura 7.7 Gráfico velocidad de deformación-intervalos de velocidad de deformación a PG.

Los valores de las velocidades de deformación para cada intervalo en estudio, se encuentran en la tabla 7.10, de los cuales podemos darnos una idea de los comportamientos de cada mezcla. De aquí deducimos que la mezcla con asfalto Eva presenta el peor comportamiento y por el contrario de la mezcla con Elvaloy se observa el mejor desempeño ante la deformación.

De las curvas de velocidades de deformación de la figura 7.7, complementamos lo comentado anteriormente, ya que aquí es evidente que mezclas se deforman con una mayor velocidad; esto lo

podemos apreciar de acuerdo a la pendiente que tenga la curva de cada mezcla, en cada intervalo, a pesar de que según la norma española marca como representativo el valor de la deformación en el último intervalo de la prueba, con las curvas mostradas en este gráfico podemos darnos una idea de las velocidades de deformación entre cada intervalo. De las curvas podemos identificar dos comportamientos distintos de estas, el primero es similar al obtenido en las pruebas realizadas a 60° C, en donde las curvas inician con una velocidad de deformación superior al último valor de deformación, esto lo podemos simplificar denominándolo con una tendencia descendente de la curva.

El otro comportamiento que se observa de las curvas es contrario al descrito anteriormente, en donde se inicia con una velocidad de deformación baja, en el primer intervalo, finalizando la prueba con una velocidad superior a la inicial, la cual definiremos como tendencia ascendente de la curva.

La tendencia descendente que se observa de las curvas en la figura 7.7 fue descrita anteriormente en el análisis de las pruebas realizadas a una temperatura de 60° C, debido a esto basta con mencionar que esta se presenta por el llenado de los vacíos en las probetas con asfalto y al finalizar este proceso, es el asfalto el que contribuye con la cohesión de las partículas y evita que se siga deformando la probeta, esto depende del tipo de asfalto, en cuanto a su capacidad de recuperarse a las deformaciones inducidas (elasticidad).

La tendencia ascendente se puede definir como aquella que presenta una mezcla en el ensayo debido a que el asfalto no contribuye a mantener ligadas las partículas de agregado, lo que se refleja en una velocidad de deformación en aumento hacia el final de la prueba. Las mezclas que presenten esta tendencia se pueden definir con una pobre capacidad de resistir la formación de las deformaciones permanentes, capacidad que se refleja en el tipo de asfalto empleado para elaborar cada mezcla, parámetro analizado.

Analizando los dos tipos de comportamiento que se describieron anteriormente definiremos, cuales mezclas presentan mejores resultados en los ensayos, a la temperatura en estudio. El mejor comportamiento lo presenta la mezcla fabricada con Elvaloy, después se encuentra la mezcla de Oxidado, detrás de estas se ubica la mezcla SBS y por último se ubica la mezcla tipo EVA; no se toma en cuenta la mezcla con AC-20 por razones descritas anteriormente.

Es importante mencionar que el comportamiento que presenta la mezcla SBS, no es el que se esperaba, de acuerdo a las características del tipo de modificador, el cual es conocido como un elastómero y se considera que su comportamiento ante las deformaciones plásticas es uno de los mejores, mas o menos parecido a el de la mezcla con Elvaloy que es del mismo tipo de modificador.

7.3.3.- Pruebas a Temperatura de Falla.

En un asfalto es de vital importancia el conocer a que temperatura dejará de comportarse de manera adecuada, para así evitar utilizarlo en zonas donde se presenten estas condiciones y con esto lograr un mejor desempeño de las mezclas asfálticas. Por este motivo se decidió ensayar a la temperatura de falla, la cual se define como aquella a la cual el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$ es igual a 2.2 kPa (para un asfalto envejecido en RTFO), adicionalmente se acordó incrementar tres grados a la temperatura de falla, debido a su proximidad con el grado PG, y así lograr una diferencia notable en cuanto resultados de ambos ensayos. Las temperaturas de falla para cada asfalto se obtuvieron por el método de caracterización reológica SUPERPAVE.

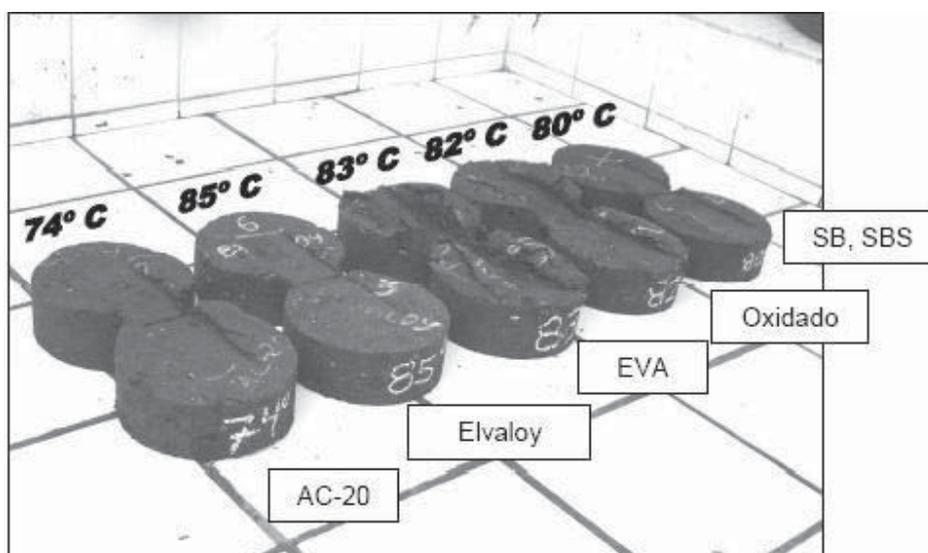


Figura 7.8 Especímenes ensayados a temperatura de falla mas 3° C, en la máquina de pista.

Tabla 7.11 Deformaciones plásticas permanentes máximas.

Mezcla asfáltica	Deformación (mm)
Salamanca AC-20	9.25
Modificado Elvaloy	3.86
Modificado SBS	4.90
Modificado EVA	19.94
Modificado Oxidado	10.77

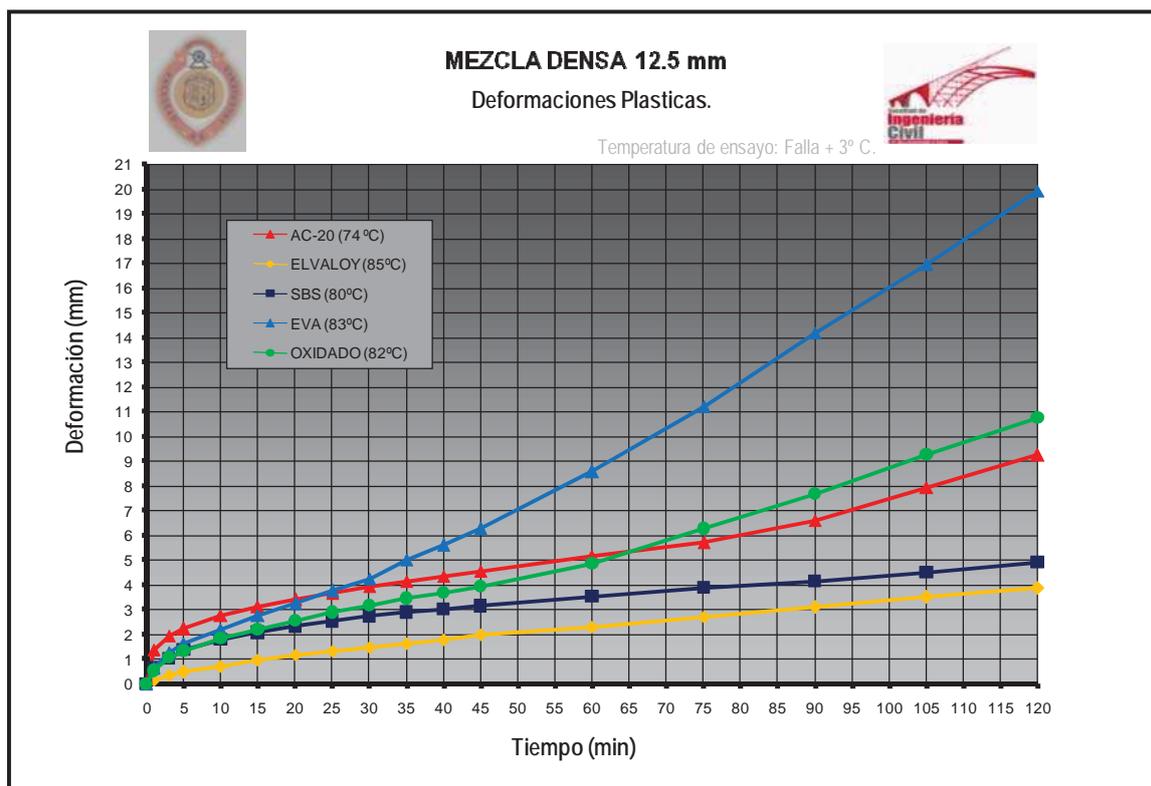


Figura 7.9 Gráfico deformación-tiempo.

Las deformaciones plásticas producidas por la maquina de pista a una temperatura donde el comportamiento del asfalto es deficiente ente este deterioro, resulta mas que evidente sobre todo en la mezcla elaborada con EVA, tal y como se puede apreciar en la fotografía que se incluye en la figura 7.8.

Los valores de deformación máximos registrados mediante el ensayo para tres tipos de mezclas son excesivos tal y como lo podemos apreciar en la tabla 7.11 y en la figura 7.9; las mezclas que presentaron estas deformaciones fueron las elaboras con asfalto EVA, Oxidado y AC-20. Tal y como se esperaba los valores mas bajos los presentan las mezclas Elvaloy y SBS.

Analizando los datos hasta ahora mostrados, el comportamiento deformación-tiempo nos indica que mezclas se deforman más con respecto a las otras, las gráficas nos sirven de comprobación de los valores mostrados en la tabla. De esta forma definiremos de bajo a alto, desempeño de las mezclas en cuanto a su susceptibilidad ante las deformaciones plásticas.

En relación a lo anterior las posiciones de las mezclas quedarían: EVA, Oxidado, AC-20, SBS y Elvaloy; debido a que las mezclas se evaluaron a distinta temperaturas, la validez de la anterior clasificación podría no ser del todo confiable, ya que no es igual ensayar una a 83° C que a 74° C, en donde la diferencia de temperaturas es de 10° C.

Tabla 7.12 Velocidades de deformación para cada intervalo a temperatura de falla + 3° C.

Mezcla asfáltica	Velocidad de deformación (mm/h)		
	V _{30/45}	V _{75/90}	V _{105/120}
Salamanca AC-20	2.54	3.56	5.28
Modificado Elvaloy	1.93	1.52	1.42
Modificado SBS	1.63	1.12	1.63
Modificado EVA	8.03	11.99	11.99
Modificado Oxidado	3.05	5.69	5.99

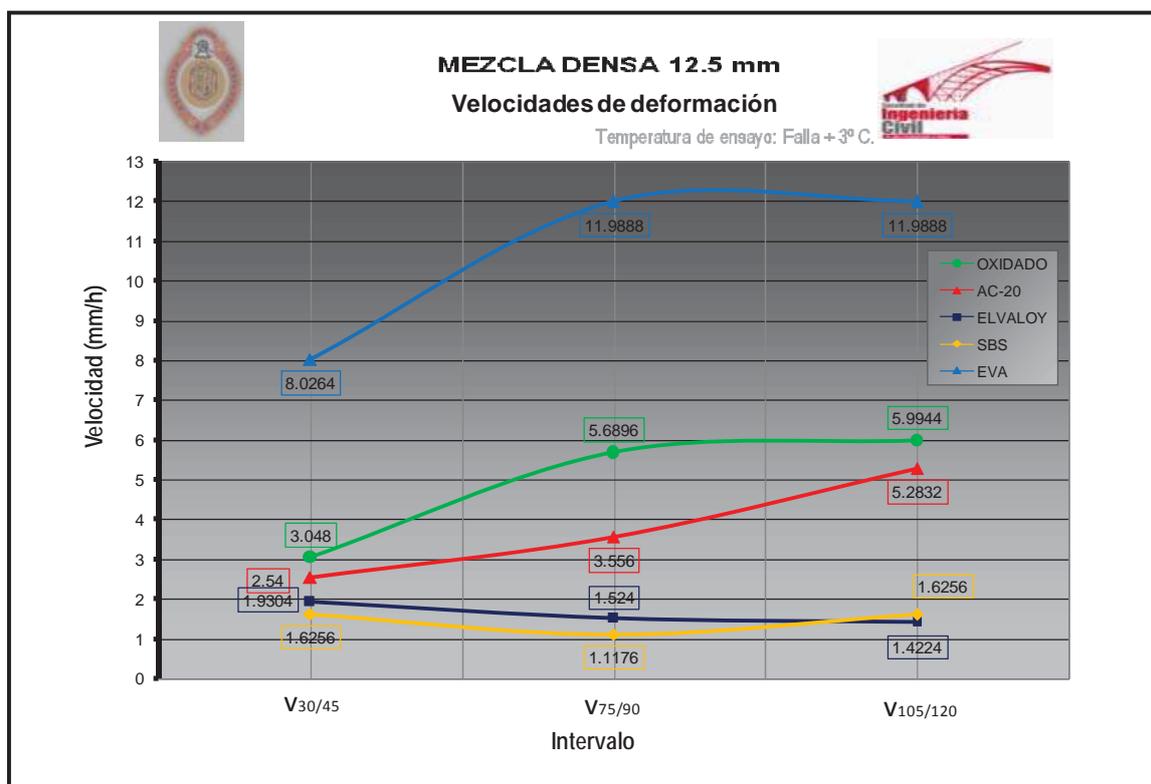


Figura 7.10 Gráfico velocidad de deformación-intervalos de velocidad de deformación a temperatura de falla más 3° C.

El siguiente comportamiento a analizar es el de velocidades de deformación, para el cual nos auxiliaremos de la tabla 7.12 y del gráfico de la figura 7.10; este comportamiento nos indica las velocidades a las que se deforman las probetas en cada intervalo en estudio o en alguno en especial, como pudiera ser el último intervalo del ensayo.

A continuación ubicaremos las mezclas en función de su velocidad de deformación de mayor a menor, quedando de la siguiente forma: EVA, Oxidado, AC-20, SBS y Elvaloy.

Analizando por último el comportamiento de las curvas presentadas en el gráfico de la figura 7.10, podemos observar nuevamente una tendencia ascendente de la mayoría de las mezclas evaluadas, este comportamiento nos define la incapacidad del asfalto de cumplir con su función en la mezcla como aglutinante, de donde considerando lo anterior podemos deducir que tipo de mezcla resulta con las características mas bajas en este aspecto; sin embargo el comportamiento definido como descendente, que se ha explicado en las pruebas realizadas a las temperaturas anteriores, por lo que se asume que se ha llegado a su comprensión, una vez dicho esto se continuará, mencionado que para esta temperatura de prueba específicamente, de las gráficas se observa que las mezclas con Elvaloy y SBS, continúan presentando un comportamiento descendente aunque a un nivel muy bajo. Comportamiento que se ha definido como satisfactorio en esta investigación, debido a que se considera, que el asfalto contribuye ante la presencia de deformaciones permanentes, manteniendo como una masa cohesiva a la mezcla e impidiendo el deterioro de esta.

7.3.4.- Resultados Generales de las Tres Temperaturas de Ensayo.

Es importante aclarar que es muy difícil llegar a una comparación directa entre las distintas mezclas, debido a que las temperaturas de ensayo son diferentes, lo cual se planteó así desde el inicio de la investigación, para comprobar o rechazar los resultados obtenidos por la caracterización reológica de los asfaltos, que es uno de los objetivos fundamentales de este trabajo.

Para poder definir los resultados de las mezclas evaluadas, de manera más clara, se elaboró una clasificación, considerando sus desempeños, de mayor a menor, ante la susceptibilidad a las deformaciones permanentes, que cada mezcla presentó, de forma parecida a lo realizado en el capítulo 4.

En la clasificación presentada en la tabla 7.13, se han considerado los siguientes parámetros para su elaboración: 1) la deformación máxima en el ensayo, 2) la velocidad de deformación evaluada en las tres temperaturas de ensayo, y 3) la susceptibilidad ante los cambios de temperatura de las mezclas; es decir, si la mezcla fue capaz de mantener deformaciones constantes, sin fallar, a través de los rangos de temperaturas evaluadas.

Es importante definir un valor máximo de deformación, que nos represente la falla de los especímenes en el ensayo de la máquina de pista de la UMICH, ya que debido a la distinta configuración de los especímenes ensayados en ella, no resultaría representativo adoptar, el valor especificado por la normativa española la cual indica, un valor de 15 mm como deformación máxima aceptada. Debido a que el buscar dicho valor, se sale de los alcances, de esta investigación, tan solo queda el hecho de comentarlo, para que estudios futuros en la pista de ensayo UMICH, se enfoquen en búsqueda de dicho parámetro.

Como comentarios finales mencionaremos que a lo largo de todas las pruebas las mezclas con mejores resultados fueron las elaboradas con asfalto Elvaloy y SBS, comportamiento esperado debido al tipo de modificador del que provienen, conocido como elastómero.

Tabla 7.13 Clasificación de las mezclas asfálticas en estudio.

Posición	Mezcla
1	Elvaloy
2	SBS
3	Oxidado
4	EVA
5	Salamanca AC-20

7.4.- Correlación de Resultados Reológicos y de la Pista de Ensayo.

Los ensayos de reología y de pista ensayo se realizaron completamente por separado, teniendo la investigación como único punto en común es la utilización de los mismos asfaltos. Como ya se menciono anteriormente los ensayos de caracterización reológica se realizaron por personal del laboratorio de asfaltos de la empresa Surfax, personal que en ningún momento intervino en los ensayos de maquina de pista y viceversa. Se trabajó intencionalmente de esta forma para introducir la mayor objetividad a la investigación y crear un mayor grado de imparcialidad de esta.

Las principales secciones, del bloque experimental de esta investigación, los podemos definir como; 1) una descripción y presentación de los resultados obtenidos de la caracterización reológica, y 2) la descripción y presentación de los resultados obtenidos mediante el ensayo de la maquina de pista. Para las dos secciones se ha concluido con una clasificación, en la cual, a razón de los resultados obtenidos, se han posicionado los asfaltos y las mezclas, de acuerdo a su comportamiento, frente a su susceptibilidad ante las deformaciones permanentes, de mejores a peores resultados presentados. Estas clasificaciones se encuentran en la tabla 4.7 y la tabla 7.13.

La importancia de las clasificaciones mencionadas en el párrafo anterior, reside en que a través de estas, se ha podido sintetizar toda la información obtenida de los ensayos, y de esta manera se puede definir de una forma mas clara si existe o no una correlación entre los resultados obtenidos en la caracterización reológica y el comportamiento de las mezclas elaboradas con los mismos asfaltos.

Las clasificaciones realizadas posicionan a los asfaltos en el mismo orden, lo que nos demuestra la existencia de una correlación entre el comportamiento de las mezclas asfálticas evaluadas y el comportamiento que se prevé mediante la caracterización reológica.

En el capítulo 4, se comentó que el método de caracterización reológica de asfaltos SUPERPAVE, no es el más indicado para clasificar algunos asfaltos, en especial los asfaltos modificados, debido a que, el parámetro $G^*/\sin \delta$ presenta poca sensibilidad a los cambios en el ángulo de fase (δ), por lo que en los asfaltos evaluados con este parámetro, se determinan temperaturas de falla, por debajo de las que realmente acepta el asfalto. Siendo el principal defecto, del método el clasificar con un mismo Grado de Desempeño (PG), asfaltos que presenten comportamientos muy diferentes ante la deformación permanente.

En la pista de ensayo se comprobó lo mencionado anteriormente, ya por medio de los ensayos a los que fueron sometidas las mezclas, elaboradas con asfalto Elvaloy y SBS, no demostraron una evidente falla de las mezclas en ninguna de las temperaturas evaluadas. Podemos explicar esto de la siguiente forma, las temperaturas de falla obtenidas por medio de los métodos SUPERPAVE refinado y ZSV, son superiores a la temperatura de falla + 3°C (máxima temperatura evaluada en la pista de ensayo), por lo que nos indica que en particular para estos dos tipos de asfaltos, presentarán un buen desempeño en las pruebas efectuadas en la pista de ensayo, aun si se llegará a incrementar la temperatura, razón por la cual las mezclas no fallaron.

Debido a lo anterior se puede confirmar que el método SUPERPAVE, no clasifica adecuadamente los asfaltos modificados, debido que el parámetro $G^*/\sin \delta$, no evalúa correctamente las características reológicas de los asfaltos, en cuanto a la resistencia a la deformación permanente se refiere. Esta deficiencia en la clasificación de los asfaltos puede resultar en una mala elección de un ligante para determinadas condiciones de trabajo del pavimento en servicio.

Como comentario final, es importante indicar que se puede establecer una buena correlación que contenga la susceptibilidad de las mezclas ante las deformaciones plásticas a diferentes temperaturas de prueba en la pista de ensayo y la información proporcionada por el método de caracterización reológica Creep repetido. Ya que si observamos que la deformación total acumulada en los 20 ciclos de la prueba Creep repetido aumenta, podemos predecir que el asfalto (con el que se fabrican las mezclas), se vuelve más susceptible a las deformaciones plásticas ante los cambios de temperatura.



Conclusiones.

Las conclusiones a las que se llegaron en este trabajo, después de realizar una extensa recopilación de datos, realización de ensayos en los asfaltos en estudio, y ensayos en las mezclas elaboradas con los mismos asfaltos; son las siguientes:

Se considera que se cumplió con el objetivo general, ya que en el bloque teórico (Capítulos 1, 2 3), se menciona la importancia de una red carretera en buen estado, la de un pavimento flexible, en la que se hace un énfasis en la superficie de rodamiento, principalmente compuesta por mezclas asfálticas; de las cuales se hace un análisis detallado. Finalizando con la ampliación del tema deformaciones permanentes, en donde se da un mayor grado de importancia a dos factores:

- ❖ Las causas que intervienen en su formación, tales como contenido y tipo de asfalto, forma, textura y graduación del agregado, contenido de vacíos, intensidad del tránsito, temperatura, entre otros.
- ❖ Los equipos para medir las deformaciones plásticas, los cuales se basan en aplicar las siguientes pruebas, esfuerzos uniaxiales, triaxiales, diametrales, y pruebas de simulación.

Es importante mencionar que aquí, es donde se justifican los parámetros usados en la investigación, como, Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, el cual se considera una prueba de simulación; la

elaboración de mezclas con las mismas características variando tan solo el tipo de asfalto, y el ensayo de estas mezclas en la pista de ensayo, variando la temperatura de prueba.

De los objetivos particulares planteados podemos decir que llegamos a las siguientes conclusiones:

El primer objetivo se encuentra muy relacionado con el objetivo general, por lo que, se considera como justificado con las conclusiones presentadas en este. A las cuales podemos agregar que se presenta un capítulo muy completo de las deformaciones plásticas, el cual se conceptualizó de forma que de principio a fin, se siga una secuencia lógica del tema.

Mediante un análisis detallado se comentaron de la forma más simple, las propuestas más actuales para la caracterización reológica de los asfaltos, en lo que a deformación permanente se refiere; se planteó de esta manera, para lograr que todo aquel con un poco de conocimiento del tema, tenga una mejor comprensión de este, en caso de analizarlo.

Se estableció un proceso de la realización de pruebas de los métodos de caracterización reológica estudiados, además que se observa que el método Creep repetido ofrece datos muy importantes para evaluar el comportamiento del asfalto ante la sollicitación de cargas repetidas y diferentes niveles de esfuerzos. Todo esto mediante la capacidad elástica real del asfalto, al recuperar las deformaciones, debido a sus propias características, ya que el DSR no interviene en este proceso, durante la fase conocida como de recuperación, diferencia notable con el método SUPERPAVE, que si lo hace.

Por medio de la evaluación de los distintos parámetros reológicos de las asfaltos en estudio, se encontró que los métodos SUPERPAVE refinado y Viscosidad a corte cero; presentaron resultados muy parecidos, en lo que se refiere a grados de desempeño (PG) y temperaturas de falla. Los cuales pueden ser comparables al relacionarlos con los obtenidos con el método Creep repetido, en donde el mejor desempeño lo presenta el asfalto Elvaloy, seguido del SBS.

Se puede decir que mediante el análisis de las características reológicas de los asfaltos, el método SUPERPAVE con el parámetro $G^*/\text{sen } \delta$, no clasifica adecuadamente los asfaltos modificados, lo cual se fundamenta con los resultados obtenidos con los otros tres métodos en estudio, ya que estos presentan resultados muy parecidos.

De los resultados obtenidos de los ensayos en la Pista de Ensayo UMICH, podemos concluir, que esta prueba simula muy bien, el efecto producido por la frecuencia de las cargas, de los neumáticos de los vehículos, lo que se ve reflejado en la susceptibilidad de las mezclas ante las deformaciones plásticas.

A través de los ensayos realizados a diferentes temperaturas, se observa que dependiendo al tipo de asfalto, puede este proporcionar o no, un aporte a la mezcla ante la formación de roderas, presentándose resultados desde muy buenos, como los obtenidos en las mezclas con Elvaloy, las

cuales presentaron un alto desempeño en las tres temperaturas evaluadas, sin llegar a la evidente falla de la mezcla; hasta muy deficientes, un ejemplo de estos son las mezclas con EVA, que inclusive para la temperatura de ensayo PG, presentó excesivos valores de deformación y altas velocidades de deformación. Sin embargo como se ha mencionado anteriormente, es difícil hacer una comparación directa de los aportes de cada asfalto, ante la sensibilidad a las deformaciones plásticas, debido a la diferencia las temperaturas de prueba de las mezclas.

Es importante mencionar que, a través de la experimentación y correlación con otros equipos de las mismas características de la Pista de Ensayo UMICH, es vital encontrar un valor de deformación máxima, acorde a las características del equipo y a la configuración de los especímenes ensayados, debido a que este es un parámetro muy importante para el diseño de mezclas, ya que se pretende que esta sea una herramienta auxiliar en este ámbito, objetivo con el cual fue construido el equipo, por parte de sus creadores.

En base a los resultados podemos decir que existe una buena correlación, entre la deformación observada en los ensayos de maquina de pista para cada mezcla, fabricada con distintos asfaltos y los datos obtenidos por medio los métodos de la caracterización reológica de los asfaltos.

El ensayo de Creep repetido, mediante el estudio de las características reológicas de los asfaltos, proporciona una predicción de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a las deformaciones plásticas, debido a los cambios de temperatura a que estas son sometidas.

En referencia a los asfaltos estudiados, podemos definir al Elvaloy como el que mostró el mejor desempeño, ya que presentó las mayores temperaturas de falla y fue el único que cumplió con los valores especificados de recuperación elástica en Creep repetido, en cuanto al análisis reológico; mientras que en las pruebas en la pista de ensayo, se observaron los valores más bajos de deformación y no se presentó una evidente falla de la mezcla.

Se confirma con los resultados obtenidos en la pista de ensayo, que el método SUPERPAVE con el parámetro $G^*/\sin \delta$, no clasifica adecuadamente los asfaltos modificados, lo que ratifica lo mencionado en base a la caracterización reológica.



Bibliografía.

1. Agnusdai J. Daños por Humedad en Mezclas Asfálticas. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005).
2. Agnusdai J, Losco O, Jair M, Morea F. Correlacion entre Ensayos que Miden Deformaciones Bajo Tránsito en Mezclas Asfálticas. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005).
3. Alarcón Ibarra J. Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doctoral. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. ETSECCPB. U.P.C. Barcelona España. (2003).
4. Alvarado González S. Estudio del Comportamiento a las Deformaciones Plásticas de Mezclas Fabricadas con Asfaltos Convencionales y Asfaltos Modificados con Polímero SBS, Utilizando la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. (2006).
5. Asphalt Institute. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. Series de Manuales No. 22. (1982).
6. Asphalt Institute. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. Traducción de la versión en inglés del Instituto Panamericano de Carreteras. Documento editado por el Asphalt Institute de los Estados Unidos. (1998).

7. Asphalt Institute. Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE. Traducción de la versión en inglés del Instituto Panamericano de Carreteras. Documento editado por el Asphalt Institute de los Estados Unidos. (1998).
8. Asphalt Institute. SUPERPAVE Series. No. 1 (SP-1). Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. USA. (1998).
9. Ayala García J. Estudio del Comportamiento a las Deformaciones Plásticas de Mezclas Fabricadas con Asfaltos AC-20 y Asfaltos Modificados PG-82, Utilizando la Pista de Ensayo de Laboratorio UMich. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH. (2006).
10. Becker Y, Mendez M, Rodriguez J. Polimer Modified Asphalt. Vision Tecnologica. Vol. 19, No. 1 (2001).
11. Binard. C, Anderson D, Lapalu L, Planche J. Zero Viscosity of Modified and Unmodified Binders.
12. Brown S. F. and P. S. Pell. Repeated Loading of Bituminous Materials. CAPSA 74. National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban. (1974).
13. Centeno Ortiz M. Evaluación de las Deformaciones Plásticas de Diferentes Asfaltos Mediante la máquina de Pista. VI Congreso Mexicano del Asfalto. (2007).
14. Cepeda Aldape J. Análisis del Comportamiento de Mezclas Asfálticas a Fisuración por Fatiga Mediante la Aplicación de un Nuevo Ensayo Dinámico a Tracción Directa. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. (2002).
15. Cremades I, Sandoval I. Caracterización de Asfalto Mediante Creep-Repetido Multi-Esfuerzo en Reometro de Corte Dinámico. VII Congreso Mexicano del Asfalto. (2007).
16. Corro Caballero S. Diseño de Pavimentos Flexibles Comportamiento de los Tramos Experimentales. Series del Instituto de Ingeniería. Instituto de Ingeniería UNAM.
17. Corro Caballero S, Prado Ollervides G, Rangel Ordóñez A. Comportamiento de Pavimentos de Altas Especificaciones en la Pista Circular del Instituto de Ingeniería UNAM. Series del Instituto de Ingeniería. Instituto de Ingeniería UNAM. (1994).
18. Corro Caballero S, Prado Ollervides G. Diseño Estructural de Pavimentos de Asfálticos, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones. Series del Instituto de Ingeniería. Instituto de Ingeniería UNAM. (1999).
19. Davis, R. Large Stone Mixes: An historical insight. IS-103, National Asphalt Paving Association. (1988).

20. Elliot R. P. et al. Effect of Aggregate Gradation Variation on Asphalt Concrete Mix Properties. Transportation Research Record No. 1317. (1991).
21. Fonseca C, Torres O, Garza S. Evaluación de Parámetros de Mezclas Asfálticas Densas Propuestas por Normatividad SCT en México. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005).
22. Garnica Anguas P, Pérez García N, y Gómez López J A. Instituto Mexicano del Transporte. Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. Publicación Técnica No. 142. (2000).
23. Garnica, et al. Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas Publicación Técnica No. No. 271. Sanfandila, Querétaro. (2002).
24. Garnica Anguas P. Mecánica de Materiales para Pavimentos. Publicación Técnica No. 197. Instituto Mexicano del Transporte. (2002).
25. Garnica Anguas P, Pérez Salazar A, Gómez López J A, Martínez Peña G I, y Chávez Cárdenas J A. Módulos de Resiliencia de Agregados Provenientes de Rocas Altamente Intemperizadas, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 256. (2004).
26. Garnica, et al. Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica No. 267. Sanfandila, Querétaro. (2005).
27. Gutierrez G, Quintero M, Caicedo B. Evaluación de las Mejoras del Asfalto para Pavimentos al ser Modificadas con Latex Acrílico-Butadieno-Carboxilado. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005)
28. Hanson D. I. et al. Evaluation and Characterization of a Rubber – Modified Hot Mix Asphalt Pavement. Transportation Research Record No. 1436. (1991).
29. 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.
30. Hoftra, A., and A.J.G. Klomp. Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions. Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Vol. 1. London. (1972).
31. Huang Yang H. Pavement Analysis and Design. University of Kentucky. Prentice Hall, inc. USA. (1993).
32. Kamel N. I. and Miller L. J. Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts. Transportation Research Record No. 1454. (1994).

33. Kandhal P. S. and Mallick R. B. Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense – Graded Asphalt Mixtures. Transportation Research Record No. 1767. (2001).
34. Krutz N. C. and Stroup – Gardiner M. Permanent Deformation Characteristics of Recycled Tire Rubber-Modified and Unmodified Asphalt Concrete Mixtures. Transportation Research Record No. 1339. (1992).
35. Lekarp Fredrik, et al. "Influences on Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials". Transportation Research Record No. 1547. (1997).
36. Linden F. and J. Van Der Heide (1987). "Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 56.
37. Mahboub K, and D.N. L Little. Improved Asphalt Concrete Design Procedure. Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute. (1988).
38. Marchan Moreno R M. Métodos de Rehabilitación de Pavimentos. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Arquitectura e Ingeniería. (2005).
39. Monismith C. L., J. Epps, and F. N. Finn. Improved Asphalt Mix Design, Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologists. Williamsburg, Virginia. Vol. 54. (1985).
40. Monismith C. L. and A. A. Tayebali. Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologists. Williamsburg, Virginia, Vol. 57. (1988).
41. Monismith C. L., et al. Permanent Deformation Response of Asphalt – Aggregate Mixes. SHRP-A-415. National Research Council. Washington, D.C. U.S.A. (1994).
42. Nosetti A, Bianchetto. Estudios Comparativos de Microaglomerados Discontinuos y SMA. 1era Parte. Resistencia al Ahuellamiento. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005).
43. Padilla Rodríguez A. Análisis de la Resistencia a las Deformaciones Plásticas de las Mezclas Bituminosas Densas de la Normativa Mexicana Mediante el Ensayo de Pista. Tesis de Postgrado. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. ETSECCPB. U.P.C. Barcelona, España. (2004).
44. Pandey B. B. et al. A Pneumatically Operated Laboratory Apparatus for Testing Soils Under Repeated Loading. Indian Geotechnical Journal. (1987).
45. Pérez F, Fonseca C, Padilla A, Torres O. Resistencia a Deformaciones Plásticas en Mezcla Densa de 19 mm Normativa SCT Evaluada Mediante la Norma NLT. 176/84 e ITESM-WT. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. (2005).

46. Rebala S. R. and Estakhri C. K. Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Mixtures Designed Using TXDOT Mixture Design Method. Transportation Research Record No. 1515. (1995).
47. Rico R.A, Del Castillo H. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Volumen 2. Editorial Limusa. México. (1992).
48. Rico Rodríguez A, Téllez Gutiérrez R, Garnica Anguas P. Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 104. (1998).
49. Santiago Corro C, Guillermo Prado O. Diseño Estructural de pavimentos Asfálticos, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones. Instituto de Ingeniería de la UNAM. (1999).
50. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes. (2001).
51. Shenoy A. Refinement of the SUPERPAVE Specification Parameter for Performance Grading of Asphalt. Journal of Transportation Engineering. Vol. 127. (2001).
52. Stuart K. D. Asphalt Mixtures Containing Chemically Modified Binders. Transportation Research Record. No. 1417. (1993).
53. Takamura Koichi. SBR Polymer in Network Chip Seal. C. BASF Corporation. (2002).
54. Uge P. and P.J. Van De Loo. Permanent Deformation of Asphalt Mixes. Koninklijke/Shell-Laboratorium. Amsterdam. (1974).
55. Wright P. H. y Paquette R.J. Ingeniería de Carreteras. Limusa, 5a edición.

PAGINAS WEB VISITADAS

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

<http://www.imt.mx>

<http://www.cedex.es>

<http://www.asphaltinstitute.org>

<http://www.fhwa.dot.gov/>

<http://www.asphaltwa.com/>

<http://www.hotmix.org/>

<http://www.pslc.ws/spanish/sbs.htm>

mauritonda@yahoo.com.ar