



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERIA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE
UNA MEZCLA DENSA FABRICADA CON ASFALTO
AC-20 CONVENCIONAL Y CON ASFALTOS
MODIFICADOS CON POLÍMEROS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN VÍAS TERRESTRES

PRESENTA:

ÚRSULA VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

TUTOR:

DR. JESÚS ALFREDO HERNÁNDEZ NOGUERA

NOVIEMBRE 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: ING. FEDERICO DOVALÍ RAMOS

Secretario: ING. ERNESTO RENÉ MENDOZA SÁNCHEZ

Vocal: DR. JESÚS ALFREDO HERNÁNDEZ NOGUERA

1^{er.} Suplente: ING. MANUEL ZARATE AQUINO

2^{do.} Suplente: M. EN I. JOSÉ ANTONIO KURI ABDALA

Lugar o lugares donde se realizó la

Tesis: **ÁREA DE VÍAS TERRESTRES, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM.**

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1 Introducción	9
1.2 Problemática	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 General	11
1.3.2 Específicos	11
1.4 Metodología	11
1.5 Estructura y contenido de la tesina	12
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	133
2.1 Introducción	13
2.2 Fisuración de un pavimento	133
2.3 Fisuración por fatiga.....	17
2.3.1 Fatiga en las mezclas asfálticas	17
2.3.2 Determinación del fallo por fatiga.....	18
2.3.3 Ley de fatiga.....	19
2.4 Procedimientos experimentales para determinar el fallo de fisuración por fatiga	21
2.4.1 Ensayo de fatiga a flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales	21
2.4.2 Ensayo de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas.....	21
2.4.3 Ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas.....	23
2.5 Ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas	24
2.5.1 Introducción	24
2.5.2 Dispositivos de ensayo	24
2.5.3 Procedimiento de ensayo	25
2.5.4 Resultados del ensayo	26
CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	30
3.1 Introducción	30
3.2 Plan de trabajo	30
3.3 Materiales empleados.....	31
3.3.1 Agregado pétreo.....	31
3.3.2 Asfaltos	33
3.4 Granulometría	35
3.5 Contenido óptimo de asfalto	37
3.6 Fabricación de probetas	40
3.6.1 Manufactura de mezclas asfálticas	40
3.6.2 Compactación de mezclas asfálticas	40
3.7 Acondicionamiento de probetas	42
3.7.1 Serrado	42
3.7.2 Pesos y dimensiones.....	44
3.7.3 Densidades	44
3.8 Ensayo de probetas en dispositivo de cuatro puntos	45
3.8.1 Colocación de probetas y ambientación	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	48

4.1 Ensayo de fatiga a cuatro puntos	48
4.1.1 Densidad aparente y contenido de huecos	48
4.1.2 Gráficos Modulo dinámico vs Numero de ciclos	51
4.1.3 Gráficos Energía vs Numero de ciclos.....	55
4.1.4 Leyes de fatiga	56
4.2 Ejemplo de aplicación	57
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	60

Índice de figuras

Fig. 1 Presencia de fisuras en la autopista México- Pachuca. [7].....14

Fig. 2 Tipos de agrietamiento por fatiga dependiendo de la gravedad de la fisura.[8].....15

Fig. 3 Pavimento que presenta alta gravedad de grietas reflejadas.16

Fig. 4 Patrón de piel de cocodrilo en carpeta asfáltica.....18

Fig. 5 Probeta trapezoidal utilizada en el ensayo de fatiga a flexión en dos puntos. [14] 21

Fig. 6 Ensayo de fatiga en tres puntos de apoyo. [17]..... 22

Fig. 7 Equipo para prueba de fatiga en cuatro puntos. 23

Fig. 8 Colocacion de una probeta en el equipo de Fatiga en cuatro puntos 24

Fig. 9 Dimensiones establecidas en la Norma AASHTO T 321-07..... 25

Fig. 10 Representación de la energía disipada contra los ciclos de carga (repeticiones)..... 28

Fig. 11 Representación de la rigidez contra el número de repeticiones. 29

Fig. 11 Características físicas del Basalto..... 32

Fig. 12 Basalto utilizado para las mezclas asfálticas con las que se realizaron los especímenes..... 32

Fig. 13 Grafica de la curva granulométrica empleada para la fabricación de mezclas asfálticas densas en este caso. 36

Fig. 14 Dosificación de agregados para fabricación de mezcla asfáltica 37

Fig. 15 Dosificación de asfalto 38

Fig. 16 Compactación Marshall 38

Fig. 17 Probetas Marshall..... 39

Fig. 18 Se muestra parte del proceso de elaboración de las placas de mezcla asfáltica, incluye el pesado de los agregados pétreos y del asfalto, así como el mezclado de estos mismos..... 40

Fig. 19 Se muestra el llenado de un molde con la mezcla asfáltica, y éste colocándose en el equipo de compactación.....41

<i>Fig. 20 Placa de mezcla asfáltica obtenida</i>	42
<i>Fig. 21 Obtención de vigas a partir del corte de la placa de mezcla asfáltica</i>	43
<i>Fig. 22 Toma de lecturas de pesos y dimensiones de cada viga</i>	44
<i>Fig. 23 Cálculo de densidad en viga</i>	45
<i>Fig. 24 Colocación de la viga en el dispositivo de ensayo</i>	46
<i>Fig. 25 Colocación del dispositivo dentro de la cámara ambiental</i>	46
<i>Fig. 26 Software de adquisición de datos de la prensa</i>	47
<i>Fig. 27 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto convencional AC-20 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga</i>	51
<i>Fig. 28 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado 70-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga</i>	52
<i>Fig. 29 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado STY 82-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga</i>	53
<i>Fig. 30 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado STY 76-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga</i>	54
<i>Fig. 31 Gráfica de energía disipada</i>	55
<i>Fig. 32 Leyes de fatiga</i>	56

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas hechas al material pétreo 33

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto convencional AC-20 33

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado 70-22 34

Tabla 4. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado STY 82-22 34

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado STY 76-22..... 35

Tabla 6. Muestra los porcentajes de pasa y retenido empleadas en cada tamaño de agregado para satisfacer la curva granulométrica empleada..... 37

Tabla 7. Muestra los resultados de las probetas con distintos porcentajes de asfaltos y la más conveniente es la que muestra un porcentaje de huecos en la mezcla de 5.25. 39

Tabla 8. Muestra el número de pasadas y la fuerza aplicada en cada una para generar la energía de compactación adecuada para la mezcla asfáltica.41

Tabla 9. Resultados de contenido de huecos en especímenes elaborados con asfalto convencional AC-20 49

Tabla 10. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado 7022... 49

Tabla 11. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado STY 82-22: 50

Tabla 12. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado STY 76-22. 51

Tabla 13. Módulos de rigidez obtenidos..... 55

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Una red carretera es estratégica para un país o región, el transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, por lo que es necesario que el transporte opere con base a parámetros de eficiencia. Por la red de carreteras fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y el 98% del movimiento de pasajeros; además, permite desarrollar los aspectos comercial, social e industrial y flujo económico. [1]

La globalización nos obliga como nación a desarrollar una infraestructura vial que nos permita ser sumamente competitivos dentro de un entorno económico. Y se puede llegar a lo anterior si se desarrolla un trabajo de construcción consiente de la vida útil del pavimento en base a su capacidad de carga, a su estructura, a la calidad de su esqueleto mineral, tipo de asfalto y del proceso constructivo, todo ello en base al clima, cargas generadas por tránsito, etc. [2]

Así que en un acto igualmente opuesto si no damos el interés y la eficiencia a la construcción y mantenimiento de nuestra infraestructura, esto significaría un gasto adicional derivado del mal estado de nuestras carreteras; es por eso que es indispensable dar énfasis a la investigación para el mejoramiento de normas, así como a los criterios de diseño y construcción de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

Un elemento fundamental en dichas infraestructuras es la capa de rodamiento o carpeta asfáltica, ya que es la capa que se encuentra en contacto con los vehículos y por lo tanto, debe brindar una buena capacidad de soporte, así como una superficie cómoda y segura durante toda su vida útil.

Dicha carpeta asfáltica con el paso del tiempo y sujeta a la inclemencia del ambiente y a las cargas de los vehículos va perdiendo sus propiedades mecánicas, es decir, se va “agotando” a este proceso de deterioro con el paso del tiempo se le conoce como fatiga. [3]

El proceso de fatiga causa en la carpeta asfáltica diversas fallas estructurales y superficiales, que son de especial interés en investigación de Vías Terrestres en todo el mundo.

A continuación se detalla la problemática derivada del proceso de fatiga en los pavimentos.

1.2 Problemática

La aparición y propagación de fisuras (micro y macro fisuras) en los pavimentos es una de las causas más frecuentes de su deterioro, y esto supone una disminución o un factor limitante del período de vida útil de los mismos. Generalmente, dicha fisuración se produce por fatiga, siendo así una de las problemáticas más frecuentes en pavimentos asfálticos.

A pesar de que en el diseño estructural del pavimento se tiene en cuenta la carga que deberá soportar éste durante su vida útil, la repetición de cargas muy inferiores a la carga máxima que puede soportar el material forma parte en la fisuración de la mezcla asfáltica. La misma propiedad anteriormente mencionada hace que las mezclas asfálticas sean idóneas para soportar las cargas del tráfico, deformándose y recuperando su forma inicial, provoca que éstas sean susceptibles a fallar por fatiga.

Así, cada ciclo de carga (el paso de un vehículo pesado, por ejemplo) provoca un daño imperceptible en la mezcla asfáltica, y es por esto que la deformación en cada ciclo se puede considerar elástica, ya que la mezcla recupera la mayor parte de la deformación que le ha sido impuesta.

Las mezclas asfálticas poseen una cualidad importante, que es la posibilidad de acumulación de daño; esta cualidad permite que la fractura o rotura se produzca de forma gradual y no súbitamente como ocurre en los materiales frágiles. Debido a la acumulación de daño en la mezcla se presenta el fenómeno de fatiga. [4]

Se entiende por fatiga el proceso de deterioro producido por la repetición periódica de una sollicitación (paso repetido de vehículos) de magnitud inferior a la resistencia máxima, que da lugar a una reducción del módulo de rigidez y aumento de deformación permanente, que conducen a una fractura total después de un cierto número de ciclos. El paso repetido de los vehículos puede transformar las micro fisuras presentes en el pavimento en macro fisuras, provocando de esta manera una pérdida de rigidez y, a largo plazo, llegar a dañar de forma irreversible el pavimento. [5]

En nuestro país, el estudio de fatiga en mezclas asfálticas ha sido muy limitado, es por ello, que esta tesina va encaminada al estudio y entendimiento del proceso de fisuración por fatiga empleando los materiales disponibles en la región (agregados y asfaltos), con la intención de que esta tesina sea el punto de inicio de una línea de investigación más ambiciosa que pueda conducir a aumentar la vida útil de los pavimentos.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Evaluar el comportamiento a fatiga de una mezcla asfáltica de granulometría densa elaborada con distintos asfaltos, convencional y modificados.

1.3.2 Específicos

- Determinar la resistencia a fatiga de una mezcla densa (norma SCT) mediante el ensayo de flexo-tracción a cuatro puntos de apoyo
- Evaluar el comportamiento a fatiga de dicha mezcla empleando tres distintos asfaltos de grado PG frente a un convencional AC-20
- Determinar las propiedades dinámicas de cada mezcla, es decir, módulo dinámico, ángulo de fase y energía disipada
- Obtener la ley de fatiga de cada mezcla asfáltica

1.4 Metodología

Para lograr los objetivos planteados en esta tesina, a continuación se enlistan una serie de actividades siguiendo una secuencia lógica de realización, con la siguiente metodología:

- Recopilación y estudio de información bibliográfica sobre el proceso de fatiga en mezclas asfálticas
- Caracterización de los materiales (agregados y asfaltos)
- Fabricación y acondicionamiento de probetas para ensayos
- Ejecución de los ensayos de fatiga a cuatro puntos
- Análisis e interpretación de resultados
- Reporte de las conclusiones obtenidas

1.5 Estructura y contenido de la tesina

La tesina consta de los siguientes capítulos:

- El primer capítulo consta de una **introducción** donde se plantea el problema de estudio de la tesina y los **objetivos** que se pretenden alcanzar mediante la realización de un estudio teórico y experimental
- El segundo capítulo presenta el **estado del arte** enfoca a la fatiga en mezclas asfálticas, dicho apartado se conforma del estudio de libros, journals, tesinas y tesis existentes sobre el tema
- El tercer capítulo se enfoca en el **desarrollo experimental**. En donde se describe los ensayos de caracterización de materiales, el proceso de fabricación de las probetas y los ensayos en el dispositivo de fatiga
- El cuarto capítulo se presenta el **análisis de resultados**, con toda la información derivada de los ensayos, se analizan y comparan los resultados a fatiga de las diferentes mezclas asfálticas en base al tipo de asfalto utilizado
- En el capítulo quinto, se dan a conocer las **conclusiones**. Aquí se presenta la información más significativa obtenida a partir del proceso experimental y de su análisis
- En el capítulo sexto se enlista la **bibliografía** consultada, como soporte para la investigación y redacción de la tesina

Finalmente, se adjuntan los tres **anexos**, los cuales contienen las tablas de datos de las probetas fabricadas, los resultados graficados de cada una de las probetas ensayadas y un informe fotográfico del trabajo experimental.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el estado del arte obtenido a partir de la búsqueda y selección de libros, artículos de revistas indexadas, documentos on-line y tesis referentes al estudio y evaluación de la fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas. Se ha puesto especial atención a los recientes avances alcanzados con la metodología SUPERPAVE (Pavimentos de desempeño superior). [6]

2.2 Fisuración de un pavimento

En la práctica es muy importante considerar dos aspectos principales para garantizar el buen desempeño de un pavimento:

- Un buen diseño del pavimento
- Adecuados y bien realizados procesos constructivos

Estos dos aspectos se complementan entre ellos, ya que aunque pudiéramos tener un proceso constructivo impecable, si el diseño del pavimento no ha sido el adecuado, no obtendremos un pavimento duradero que de a los usuarios seguridad y confort.

Es muy importante tomar en cuenta el deterioro del pavimento y hacer uso de las investigaciones realizadas para poder prolongar su horizonte de servicio, más aún tomando en cuenta el crecimiento substancial que se tiene tanto de número de vehículos como del incremento de la capacidad de carga de los mismos.

La fisuración en una carpeta asfáltica tiene repercusiones preocupantes:

1. Aumenta el Índice de Rugosidad Internacional (IRI)
2. El nivel de servicio se ve afectado
3. Al haber fisuras permite que el agua, durante la época de lluvias, penetre la carpeta y se infiltre en las capas inferiores, disminuyendo su capacidad estructural
4. La presencia de agua en las capas inferiores, sobre todo en la base, y al ser sometida a cargas verticales (paso de los vehículos), provoca lo que se denomina bombeo o expulsión de finos hacia el exterior. (Fig. 1)



Fig. 1 Presencia de fisuras en la autopista México- Pachuca. [7]

El agrietamiento puede ser resultado de una combinación de los siguientes mecanismos:

- Agrietamiento inducido por el tránsito
- Agrietamiento por temperatura
- Agrietamiento por reflexión

En el agrietamiento inducido por el tránsito, las cargas inducen esfuerzos y deformaciones en las capas del pavimento (Fig. 2). Dependiendo de la estructura del pavimento y las propiedades de las capas, los esfuerzos de tensión y cortantes y las deformaciones son inducidas en lugares específicos de las capas confinadas. La aplicación repetida de esos esfuerzos y deformaciones, con el paso repetido del tránsito, inducirá agrietamientos por fatiga en esos puntos.

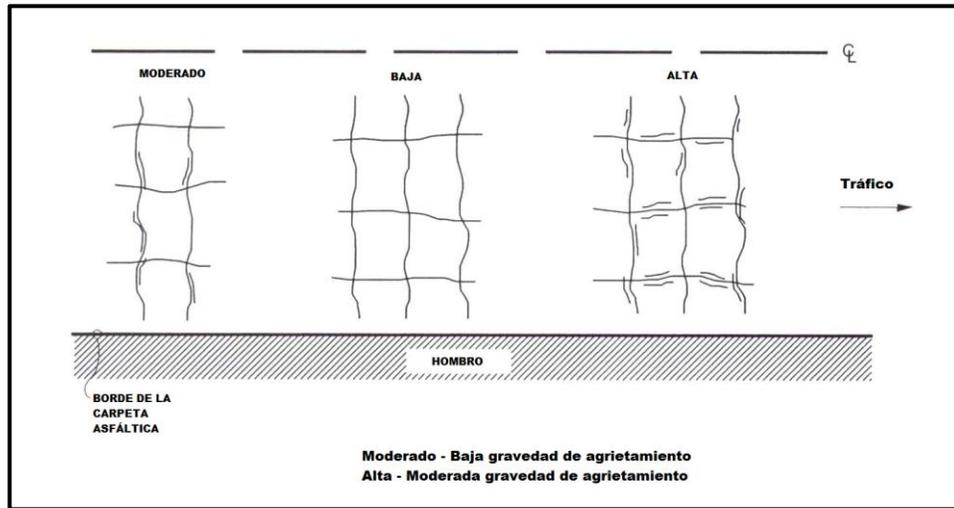


Fig. 2 Tipos de agrietamiento por fatiga dependiendo de la gravedad de la fisura.[8]

En el agrietamiento por temperatura, cuando se presentan temperaturas muy bajas en la superficie del pavimento, se provocaran esfuerzos de tensión y deformaciones en el pavimento, debido a la contracción térmica.

A temperaturas muy bajas, y especialmente debajo el punto de transición de cristalización del asfalto, la relajación de los esfuerzos de tensión inducidos termalmente ocurren muy despacio. Consecuentemente los esfuerzos de tensión se incrementan cuando el camino se enfría, lo cual puede exceder la resistencia del asfalto.

En el asfalto, las grietas podrían aparecer y propagarse con los ciclos termales. Estos esfuerzos de tensión inducidos termalmente pueden también combinarse con esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito causando el agrietamiento.



Fig. 3 Pavimento que presenta alta gravedad de grietas reflejadas.

También, las grietas pueden ocurrir en la capa base confinada de cemento de un camino compuesto como resultado de los gradientes térmicos. Cuando la superficie de un camino está más caliente que la base, el gradiente térmico causara alabeo el cual será restringido por la capa estabilizada con cemento. Esto provocara un esfuerzo de tensión en la parte inferior de la capa estabilizada con cemento, lo que puede llevar al agrietamiento cuando se combina con los esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito.

Los agrietamientos por reflexión ocurren si una capa de asfalto yace sobre una capa con grietas o juntas, lo cual muestra movimientos horizontales muy grandes debido a variaciones en la temperatura, o cuando no existe o existe muy poca transferencia de carga a través de las grietas o juntas. [8]

Dichos agrietamientos pueden ser causados por deformaciones horizontales controladas por la temperatura de los materiales subyacentes. Estas deformaciones provocarán esfuerzos de tensión en la capa superior, llevando a grietas de reflexión, con y sin la presencia del tránsito.

Si la transferencia de cargas a través de las grietas o juntas es baja, resultando en un gran desplazamiento vertical relativo debido a las cargas generadas por el tránsito, provocará esfuerzos cortantes muy altos en la capa de asfalto alrededor del área de las juntas. Si los esfuerzos cortantes son mayores que la resistencia del asfalto o el número de repeticiones de cargas es suficiente para causar fatiga, las grietas aparecerán en la parte superior de la capa de asfalto en la misma posición de las grietas o juntas de la capa subyacente.

Como se ha mostrado, cada uno de estos factores contribuyen a que las superficie de rodamiento de un pavimento sea la zona más susceptible de fisuración y derivado de ello, es importante realizar un buen diseño de pavimento y de mezcla asfáltica con la finalidad de prolongar la vida útil de la estructura.

A continuación se describe de forma detallada el tema central de esta tesina que es la fisuración por fatiga y sus procesos de propagación.

2.3 Fisuración por fatiga

2.3.1 Fatiga en las mezclas asfálticas

La fisuración por fatiga y reflexión de fisuras a través de las capas asfálticas del pavimento, es uno de los principales mecanismos de deterioro que sufren los pavimentos durante su vida de servicio y estos son ocasionados como se presenta en el inciso anterior por la acción combinada de las cargas repetidas del tráfico, esfuerzos y deformaciones térmicas.

La fatiga en las mezclas asfálticas se traduce en una pérdida de su resistencia y se pone de manifiesto por la disminución de la rigidez (disminución del módulo dinámico) y por las fisuras generalizadas causadas por el aumento de las deformaciones superficiales elásticas. Es por este motivo, que para el diseño de un pavimento es necesario conocer el comportamiento y la resistencia a fatiga que tendrán todas las capas de la mezcla asfáltica que componen el pavimento.[9]

El comportamiento de la mezcla en carretera se puede interpretar como cuando los componentes de la tensión en un punto dado de la carretera aumentan cuando la rueda se aproxima, llega a su punto máximo cuando la rueda la tiene encima, y decrece a medida que la rueda pasa adelante. La componente horizontal de compresión a la parte superior de la capa de rodadura se convierte en tensión en la parte inferior. Así, el tránsito actual consiste en cargas cortas y rápidas seguidas de periodos de reposo. Dichas sollicitaciones causan fisuras longitudinales y transversales.

Las primeras fisuras encontradas en el pavimento son fisuras de tipo longitudinal; así pues, los daños son causados por las tensiones transversales. Consecuentemente, las tensiones transversales son más perjudiciales que las longitudinales en las mismas condiciones. Posteriormente, las fisuras transversales se reproducen hasta que se llega a la ya mencionada fisuración generalizada del pavimento (“piel de cocodrilo”).



Fig. 4 Patrón de piel de cocodrilo en carpeta asfáltica

2.3.2 Determinación del fallo por fatiga

Como se ha visto, las características de las mezclas asfálticas usualmente son expresadas como relaciones entre el esfuerzo o deformación inicial y el número de repeticiones para la falla, determinadas mediante el uso de pruebas de flexión repetida, tensión directa o diametral desarrolladas a distintos niveles de esfuerzos o deformaciones.

El comportamiento por fatiga de una mezcla específica puede ser caracterizado por la pendiente y nivel relativo de los esfuerzos o deformaciones contra el número de aplicaciones de carga necesarios para la falla y puede ser definido por una relación de la siguiente manera:

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_0} \right)^b \left(\frac{1}{S_0} \right)^c$$

Donde:

N_f = Vida de diseño por fatiga

ϵ_0 = Deformación a la tensión

S_0 = Rigidez inicial de la mezcla

a, b, c = Coeficientes determinados experimentalmente

Varios modelos han sido propuestos para predecir la vida de diseño por fatiga de pavimentos. Para desarrollar estos modelos, los resultados de laboratorio han sido calibrados mediante la aplicación de factores basados en observaciones de campo para proveer estimaciones razonables del ciclo de vida en servicio de un pavimento basado en los límites de la cantidad de grietas debidas a cargas repetidas.

Investigadores han utilizado métodos de energía para predecir el comportamiento por fatiga de mezclas asfálticas. Algunos sugirieron que el método de energía disipada ofrece resultados de diferentes tipos de pruebas, llevadas a cabo bajo para diferentes condiciones con varios tipos de mezclas asfálticas, siendo descrita por una relación simple de mezcla específica que relaciona el número de ciclos para que ocurra la falla con la energía disipada acumulada.

Por lo tanto, tal método podría hacer posible la predicción del comportamiento por fatiga de mezclas en el laboratorio sobre un amplio rango de condiciones para los resultados de unas pocas pruebas simples de fatiga. Tal relación puede ser caracterizada en la siguiente forma:

$$W_N = A(N_f)^z$$

Donde:

N_f = Vida de diseño por fatiga

W_N = Energía disipada acumulada para que ocurra la falla

A, z = Coeficientes determinados experimentalmente

El método fenomenológico de regresión es un método muy común para analizar los materiales de carreteras. La capa superficial es caracterizada por fatiga utilizando la siguiente relación:

$$N_f = K_1 (\frac{1}{\epsilon_t})^{K_2}$$

Donde:

N_f = Número de repeticiones o aplicaciones de carga para que ocurra la falla

ϵ_t = Deformación a la tensión inducida

K_1, K_2 = Constantes de regresión

Esta ecuación describe una línea recta sobre un trazo de ciclos para que ocurra la falla contra la deformación por flexión, donde $\log K_1$ es la intercepción del eje Y (el eje Y ocurre donde $\log K_1 = 0$ ó $K_1 = 1$), $-K_2$ es la pendiente de la línea recta.

2.3.3 Ley de fatiga

La expresión simplificada que establece la SHELL para definir una ley de fatiga de una mezcla bituminosa es: [12]

$$N = ((0.856Vb + 1.08)(10^6 E)^{-0.36})^5 \epsilon^{-5}$$

Donde:

Vb es el % de betún en volumen y E es el módulo de la mezcla en Mega pascales.

N_f = Número de repeticiones o aplicaciones de carga para que ocurra la falla

ϵ_t = Deformación a la tensión

S_{mix} = Rigidez por flexión de la mezcla

V_b = Contenido de asfalto por volumen

Esta relación fue obtenida a partir de un estudio donde losas de asfalto fueron ensayadas en una máquina de simulación bajo un rodillo, y se concluyó que los patrones de grietas observados eran muy similares a aquellos definidos en la práctica como agrietamiento de “piel de cocodrilo”.

Por su parte el Instituto del Asfalto (AI) establece la siguiente expresión:

$$N = (0.0796 * C * (0.145E^{-0.854}) * \epsilon^{-3.291})$$

Donde C es un factor de corrección expresado por:

$$C=10^M$$

Donde V_a y V_b son respectivamente el volumen de aire (huecos) y el volumen de asfalto.

Para $V_a =$ y $V_b= M=$ y $C=1$ con lo que la expresión del AI se reduce a :

$$N = 0.0796(\epsilon^{-3.291}) * (0.145E)^{-0.854}$$

Los métodos anteriores permiten estimar el comportamiento a fatiga de cualquier tipo de Mezcla asfálticas, incluidas las mezclas de alto módulo.

Los métodos para desarrollar modelos empírico-mecanicistas basados en el agrietamiento por fatiga utilizan modelos desarrollados a través de pruebas de laboratorio empleando el ensaye de tipo viga. La información de pruebas de fatiga en laboratorio típicamente se expresa de la siguiente manera:

$$N_f = K_1(e)^{-K_2}(E_{ac})^{-k_3}$$

Donde:

N_f = Número de aplicaciones de carga para que ocurra la falla

e = Deformación a tensión repetida

E_{ac} = Módulo dinámico de elasticidad del concreto asfáltico (psi)

K_1, K_2, K_3 = Constantes que dependen de las propiedades del material.

2.4 Procedimientos experimentales para determinar el fallo de fisuración por fatiga

2.4.1 Ensayo de fatiga a flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales

Los ensayos de flexión se utilizan para medir el módulo de rigidez y evaluar la resistencia a la fatiga de materiales asfálticos para pavimentación. El ensayo de flexión de dos puntos sobre muestras trapezoidales es, sin duda, el método de ensayo más repetible y reproducible detallado en las normas EN12697. [13]

La base es fija y la parte superior se mueve sinusoidalmente con una amplitud de desplazamiento constante. La forma sinusoidal asegura que los valores máximos del esfuerzo y deformación de flexión se produzcan lejos de los extremos de la muestra, en la que es probable que existan concentraciones de esfuerzos.

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a carga de fatiga, con desplazamiento controlado por flexión en dos puntos, utilizando probetas trapezoidales.



Fig. 5 Probeta trapezoidal utilizada en el ensayo de fatiga a flexión en dos puntos. [14]

Este método se puede utilizar para mezclas asfálticas, con agregados cuya granulometría máxima sea de hasta 20 mm, sobre probetas preparadas en laboratorio u obtenidas de capas de carretera con un espesor de 40 mm como mínimo. [15]

2.4.2 Ensayo de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas

El ensayo de flexo-tracción dinámica a tres puntos de apoyo, con control de desplazamiento, se recoge en la norma española NLT-350/90. [16]

El ensayo consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía con el tiempo según una función sinusoidal, relacionando las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez de la probeta a la mitad, se obtienen pares de valores correspondientes a varios ensayos a diferentes amplitudes de desplazamiento, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.



Fig. 6 Ensayo de fatiga en tres puntos de apoyo. [17]

El estado de tensiones de la mezcla bituminosa se produce en un punto situado en el centro geométrico de la cara en que se encuentran los dos apoyos. Esta tensión actúa normalmente a un plano perpendicular al plano de la cara de apoyo

La tensión se calcula para cada ciclo, a partir de la función de carga registrada y de las dimensiones de la probeta y distancia entre apoyos. El estado de deformaciones de la probeta se caracteriza por la deformación que se produce en el mismo punto en que se define la tensión y según la normal al mismo plano mencionado. La función deformación se determina, para cada ciclo, a partir de la función extensométrica registrada y de la distancia entre apoyos.

El módulo dinámico en un determinado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación. La amplitud cíclica de una función en un ciclo es el valor absoluto de la diferencia entre su valor máximo y su valor mínimo en ese ciclo. [15] Y el ángulo de desfase se define como el desfase existente entre las funciones de tensión y deformación.

2.4.3 Ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas

Los ensayos de resistencia a la flexión son los métodos más utilizados para evaluar la resistencia a la fatiga de los materiales bituminosos. Los ensayos de flexión en cuatro puntos están incluidos en las especificaciones de las normas AASHTO. [18]

La muestra es una viga prismática sometida a una carga sinusoidal en modo de deformación controlada. Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a carga de fatiga en un equipo de ensayo de flexión en cuatro puntos, en el que las mordazas interiores y las exteriores están colocadas simétricamente utilizándose probetas rectangulares esbeltas (probetas prismáticas).

La probeta prismática se debe someter a cargas periódicas de flexión en cuatro puntos, con rotación y traslación libres en todos los puntos de carga y de reacción a éstas.



Fig. 7 Equipo para prueba de fatiga en cuatro puntos.

La flexión se debe realizar por la aplicación de la carga en dos puntos interiores (mordazas interiores), en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. Se debe fijar la posición vertical de los soportes de extremo (mordazas exteriores). Esta configuración de carga debe crear un momento constante, y por tanto, una deformación constante entre las dos mordazas interiores. La carga aplicada debe ser sinusoidal. Durante el ensayo, se debe medir la carga necesaria para la flexión de la probeta, la deflexión y el desfase entre estas dos señales, en función del tiempo. Con estas mediciones se deben determinar las características de fatiga del material sometido a ensayo.

A continuación se detalla el ensayo de fatiga a 4 puntos debido a que es el ensayo que se seguirá en la fase experimental.

2.5 Ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas

2.5.1 Introducción

Esta norma establece los procedimientos para la determinación de la resistencia a la fatiga y la energía a la fatiga en especímenes con dimensiones de 380 mm. de largo por 50 mm. de espesor por 63 mm. de ancho de haz de mezcla asfáltica en caliente, especímenes cortados en laboratorio o de campo compactados de HMA y se somete a la flexión repetida hasta la rotura. El fallo de la probeta se considera en el ciclo de carga donde se presenta una reducción del 50 por ciento de la rigidez inicial.

La resistencia a la fatiga y la energía de falla determinada por esta norma puede ser utilizada para estimar la vida a fatiga de las capas de pavimento de mezcla asfáltica en la carga de tráfico repetido. El desempeño de la mezcla asfáltica puede ser predicho con más exactitud cuando estas propiedades se conocen. [18]

2.5.2 Dispositivos de ensayo

Los dispositivos de ensayo deben ser dimensionalmente los adecuados según lo especificado por la norma, como se mencionó con anterioridad, que exista un mecanismo para el establecimiento de separación adecuada de las abrazaderas que sujetaran el espécimen.

Para los dispositivos de carga debe existir un sensor para la medición de la deformación, y hacer referencia al Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT) con respecto al eje neutro de la muestra.

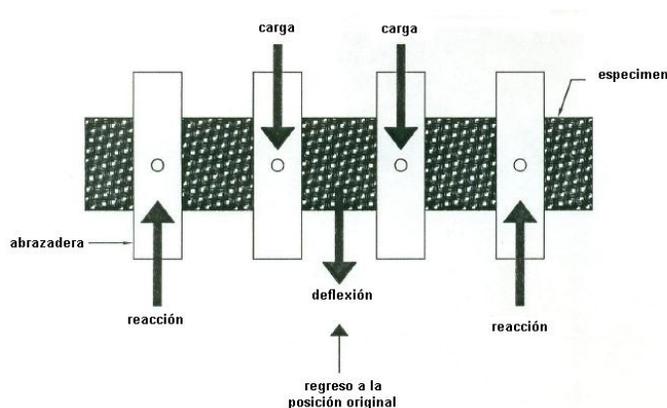


Fig. 8 Colocacion de una probeta en el equipo de Fatiga en cuatro puntos

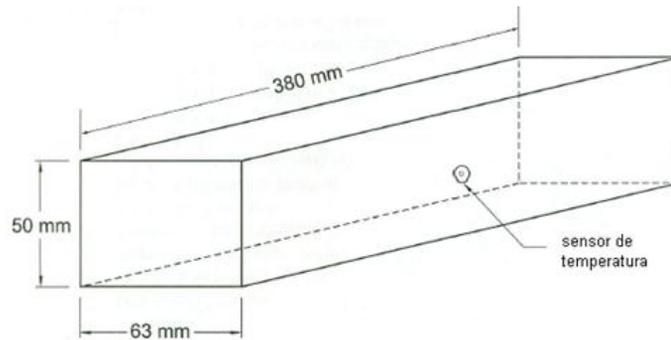


Fig. 9 Dimensiones establecidas en la Norma AASHTO T 321-07

2.5.3 Procedimiento de ensayo

Como primer paso, se determinan las dimensiones, altura, ancho y largo de cada uno de los especímenes con una precisión de 0.01 mm de acuerdo con las secciones aplicables de la norma ASTM D 3549. Con ello, se determina el promedio de tres mediciones de cada dimensión y se registra.

Después, se coloca el sensor de temperatura al eje neutro de la muestra en uno de sus lados, colocando resina epoxica alrededor de este punto central, evitando rellenar de más con dicha resina para no obstruir el punto central. Se deja secar la resina epoxica antes de iniciar la prueba.

Mientras tanto, se coloca la muestra en un entorno acondicionado a una temperatura de 20 ± 0.5 °C durante dos horas para asegurar que la muestra este a la temperatura requerida antes de iniciar la prueba.

Una vez ambientada la probeta, se abren las abrazaderas y se coloca la probeta en su posición. Para este procedimiento se ha utilizado la plantilla para garantizar la adecuada colocación en las abrazaderas horizontales del espacio 119 mm de centro a centro. Cuando la muestra y las abrazaderas están en la posición correcta cerca de las pinzas le he aplicado una presión suficiente para mantener la muestra en su lugar y fija.

Ya fija la probeta, se coloco el sensor de LVDT con una lectura cercana a cero.

Ya colocada la probeta y los sensores en la prensa de ensayo, se asigna en el software de control una amplitud inicial (entre 250 a 750 microstrain) y la frecuencia de carga, así como el ciclo de intervalos en los que los resultados son registrados y calculados al ingresarlos. La selección de los intervalos de carga en el que los resultados son calculados y registrados estos pueden ser limitados por la cantidad de memoria disponible para almacenar datos.

En el ciclo 50 de carga a una tensión constante de 250 a 750 microstrain, se determina la rigidez de la muestra. Esta rigidez es una rigidez de la estimación inicial, que se utiliza como referencia para determinar el fracaso de la muestra.

Se seleccionó un nivel de deflexión (nivel de tensión) de manera que la muestra se someta a 10,000 ciclos de carga antes de que su rigidez se reduzca al 50 por ciento o menos en comparación de su rigidez inicial.

Si la reducción de la rigidez se reduce al 50 por ciento o menos se considera por norma que la probeta a fallado por fatiga.

2.5.4 Resultados del ensayo

A partir del ensayo experimental se pueden determinar los siguientes parámetros:

Tensión de tracción máxima (Pa)

$$\sigma_t = (0.357P)/bh^2)$$

Dónde:

P: carga aplicada por el actuador, en newtons;

b: ancho de la muestra promedio, en metros, y

h: altura promedio de muestra, en metros.

Tensión de tracción máxima (m / m):

$$\varepsilon_t = (12\delta h)/(3L^2 - 4a^2)$$

Dónde:

Máxima deflexión en el centro de la viga, en m;

El espacio entre las piezas de su interior, 0.357 / 3 m, (0.119 m), y

Longitud de la barra entre las piezas de exterior, 0.357 m.

La rigidez a la flexión (Pa):

$$S = \sigma_t/\varepsilon_t$$

Donde:

σ_t : Estrés de tracción máxima (Pa)

ϵ_t : Tensión de tracción máxima (m / m)

Ángulo de fase (grados):

$$\varphi = 360fs$$

Dónde:

f = frecuencia de carga, en Hz, y

s - tiempo que transcurre entre Pmax y Smax> en cuestión de segundos.

Energía disipada (J/m³) por ciclo:

$$D = \pi\sigma_t\epsilon_t\text{sen}(\varphi)$$

Donde:

σ_t : Estrés de tracción máxima (Pa)

ϵ_t : Tensión de tracción máxima (m / m)

φ :Ángulo de fase

Energía disipada acumulada, J/m³:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Di$$

Dónde:

Di = D para el ciclo de carga de i°.

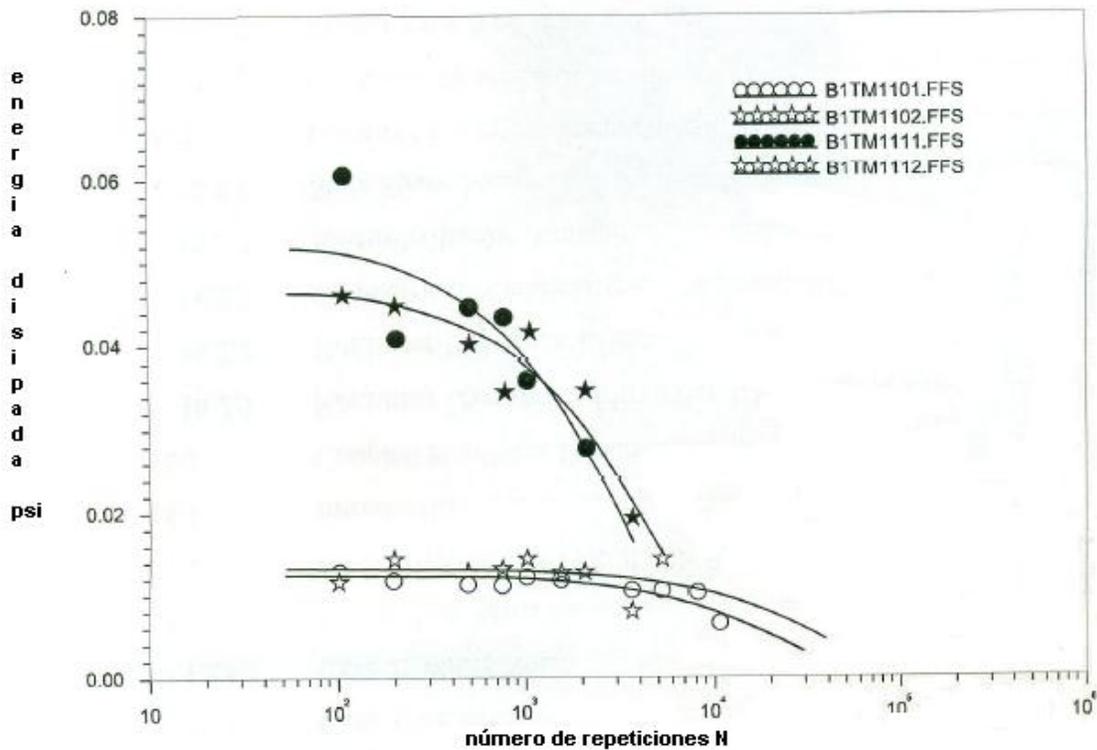


Fig. 10 Representación de la energía disipada contra los ciclos de carga (repeticiones).

Rigidez inicial (Pa)

La rigidez inicial es determinada por el trazado de la rigidez (S) en contra de la carga ciclos (n) y que mejor se ajusta los datos a una forma de función exponencial de muestra en la ecuación a continuación.

La figura 8 muestra un gráfico típico de la rigidez frente a los ciclos de carga. La constante A representa la rigidez inicial.

$$S = Ae^{bn}$$

- Donde:
- e= logaritmo natural en base e;
 - A= constante, y
 - b= constante

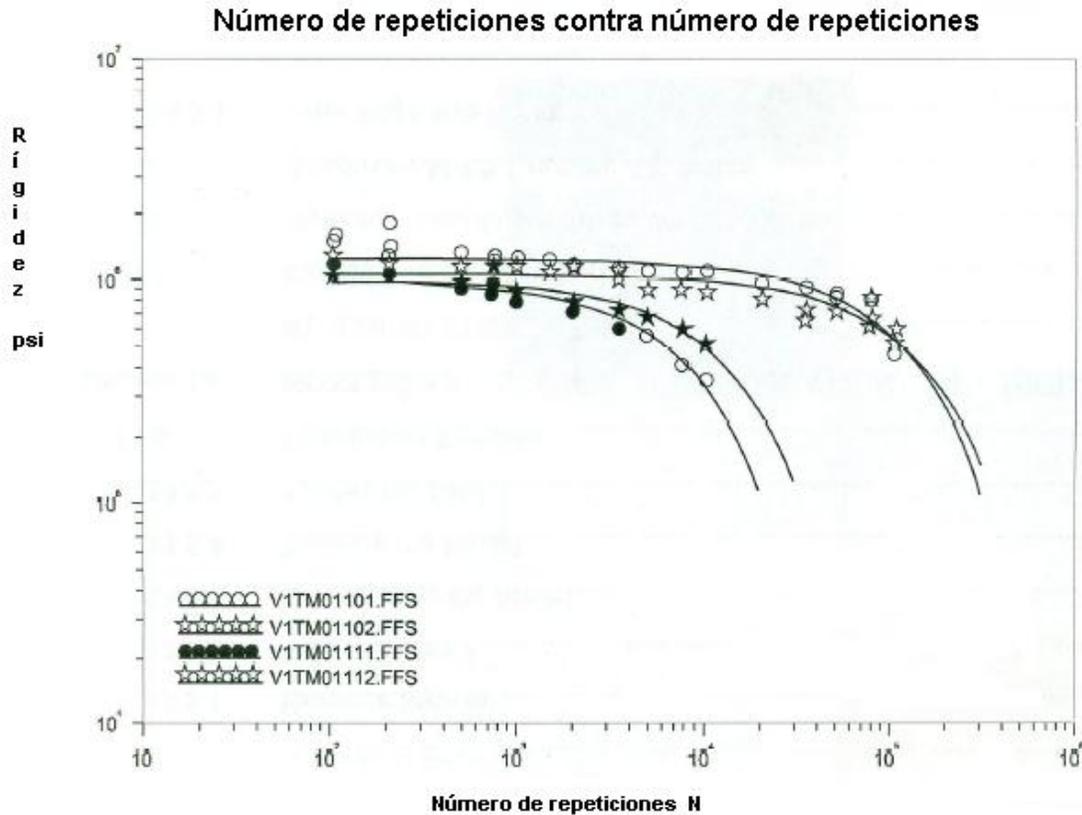


Fig. 11 Representación de la rigidez contra el número de repeticiones.

Ciclos de Falla de la Prueba

Se define como fracaso de la prueba cuando la rigidez se ha reducido en una 50% en comparación con la rigidez inicial. El ciclo de carga a la que se produce un fallo se calcula mediante la resolución de n de la ecuación anterior, "Rigidez Inicial", o simplemente con la formula a continuación:

$$N_{f50} = [\ln(S_{f50}/A)]/b$$

Donde:

$S_{f,50}$ = la rigidez, el 50 por ciento de la rigidez inicial, en Pa, y
 $S_{f,50}/A = 0,5$, por definición.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se describen las actividades y pruebas previas para obtener las características tanto de los agregados pétreos utilizados como de los asfaltos tanto convencional como modificados así como las pruebas realizadas a mezclas asfálticas para conocer el porcentaje óptimo de asfalto y el diseño de la mezcla asfáltica en caliente satisfactoria para ser experimentada con el método estándar de la prueba “Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending”, así como la propia experimentación de dicha prueba.

3.2 Plan de trabajo

En el desarrollo de este trabajo de investigación se realizaron diversas pruebas de caracterización tanto a los agregados pétreos utilizados, como a los distintos asfaltos empleados (asfalto convencional AC-20 y tres asfaltos modificados respectivamente), así mismo se realizaron pruebas Marshall para identificar el contenido óptimo de asfalto para las mezclas utilizadas.

Consecutivamente se elaboraron las mezclas asfálticas en caliente y se compactaron con esto se obtuvieron 12 placas de 40 x 30 x 5 cm respectivamente, las cuales fueron cortadas con las dimensiones que indica la prueba (38 x 6.3 x 5 cm).

Los especímenes obtenidos fueron pesados, dimensionados y se obtuvieron sus densidades, teniendo 10 especímenes por cada tipo de asfalto.

Concluido lo anterior los especímenes se colocaron en el equipo de fatiga a cuatro puntos para llevar a cabo las pruebas.

A continuación se muestran las pruebas de caracterización realizadas

1.- Ensayos de caracterización a los agregados:

- Desgaste en la máquina de Los Ángeles (M-MMP-4-04-006/02)
- Densidad de finos (M-MMP-4-04-003/02)

- Densidad de gruesos (M-MMP-4-04-003/02)
- Caras fracturadas (M-MMP-4-04-013/09)
- Partículas alargadas y lajeadas M-MMP-4-04-005/08)
- Equivalente de arena (M-MMP-4-04-004/02)

2.- Ensayos de caracterización a los asfaltos:

- Penetración (M-MMP-4-05-006/00)
- Reblandecimiento anillo y bola (M-MMP-4-05-009/00)
- Punto de inflamación (M-MMP-4-05-007/00)
- Envejecimiento de película delgada (M-MMP-4-05-010/02)

Todos estos ensayos se realizarán de acuerdo a la normativa SCT.

3.3 Materiales empleados

Como parte del trabajo de investigación y complementando la prueba experimental de Fatiga a flexión en cuatro puntos, se realizaron pruebas a los materiales que conforman la mezcla asfáltica utilizada para dicho fin, tales como al basalto como agregado pétreo, así como al asfalto convencional AC-20 y a los tres asfaltos modificados.

3.3.1 Agregado pétreo

El material utilizado como esqueleto mineral fue basalto obtenido del banco PINFRA ubicado en el Estado de México. Algunas de las características del material son las siguientes:



Fig. 11 Características físicas del Basalto.



Fig. 12 Basalto utilizado para las mezclas asfálticas con las que se realizaron los especímenes.

Las pruebas realizadas a los agregados pétreos fueron realizadas bajo la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes vigente.

TIPO DE PRUEBA	RESULTADOS	NORMA DE REFERENCIA
Desgaste de Abrasión los Ángeles	17.49 %	M-MMP-4-04-006/02
Densidad de finos	2.73	M-MMP-4-04-003/02
Densidad de gruesos	2.69	M-MMP-4-04-003/02
Partículas Trituradas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	100 %	M-MMP-4-04-013/09
Partículas alargadas y lajeadas	23.35 %	M-MMP-4-04-005/08
Equivalente de arena para Materiales Pétreos	63.66 %	M-MMP-4-04-004/02

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas hechas al material pétreo.

3.3.2 Asfaltos

Las pruebas realizadas a los asfaltos fueron bajo la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

ASFALTO CONVENCIONAL AC-20		
TIPO DE PRUEBA	RESULTADOS	NORMA DE REFERENCIA
Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos	77	M-MMP-4-05-006/00
Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos	50.8 °C	M-MMP-4-05-009/00
Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos	239 °C	M-MMP-4-05-007/00
Envejecimiento en Película Delgada	0.65%	M-MMP-4-05-010/02

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto convencional AC-20

ASFALTO MODIFICADO 70-22		
TIPO DE PRUEBA	RESULTADOS	NORMA DE REFERENCIA
Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos	64	M-MMP-4-05-006/00
Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos	59.6 °C	M-MMP-4-05-009/00
Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos	295 °C	M-MMP-4-05-007/00
Envejecimiento en Película Delgada	0.63 %	M-MMP-4-05-010/02

Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado 70-22

ASFALTO MODIFICADO STY 82-22		
TIPO DE PRUEBA	RESULTADOS	NORMA DE REFERENCIA
Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos	52	M-MMP-4-05-006/00
Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos	67.1 °C	M-MMP-4-05-009/00
Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos	263 °C	M-MMP-4-05-007/00
Envejecimiento en Película Delgada	0.503%	M-MMP-4-05-010/02

Tabla 4. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado STY 82-22

ASFALTO MODIFICADO STY 76-22		
TIPO DE PRUEBA	RESULTADOS	NORMA DE REFERENCIA
Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos	62	M-MMP-4-05-006/00
Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos	61.3 °C	M-MMP-4-05-009/00
Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos	273 °C	M-MMP-4-05-007/00
Envejecimiento en Película Delgada	0.54%	M-MMP-4-05-010/02

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas al asfalto Modificado STY 76-22

3.4 Granulometría

La curva granulométrica empleada para la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente está dentro de los parámetros y requerimientos que establece la Secretaria de Comunicaciones y Transportes en la norma N-CMT-4-04/08.

Dando como resultado la curva granulométrica que a continuación se muestra.

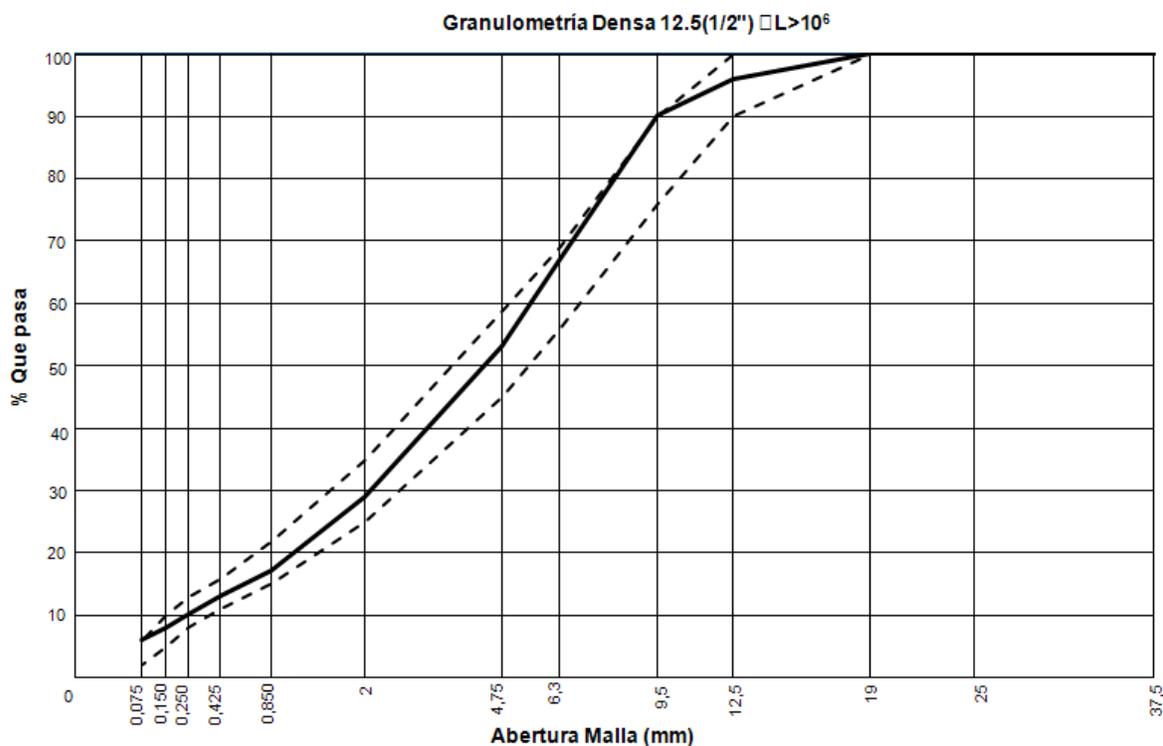


Fig. 13 Grafica de la curva granulométrica empleada para la fabricación de mezclas asfálticas densas en este caso.

TAMAÑO TAMIZ pulg	TAMAÑO TAMIZ mm	DISTANCIA ORIGEN	Huso 1/2" inf	Huso 1/2" sup	PASA (%)	retenido
1 1/2"	37,5	23,43	100	100	100	0
1	25	19,52	100	100	100	0
3/4	19	17,25	100	100	100	0
1/2	12,5	14,29	90	100	96	4
3/8	9,5	12,63	76	90	90	6
1/4	6,3	10,50	56	69	67	23
N 4	4,75	9,25	45	59	53	14
N 10	2	6,27	25	35	29	24
N 20	0,85	4,26	15	22	17	12
N 40	0,425	3,12	11	16	13	4
N 60	0,25	2,46	8	13	10	3
N 100	0,15	1,95	5	10	8	2
N 200	0,075	1,43	2	6	6	2
Filler					0	6
						100

Tabla 6. Muestra los porcentajes de pasa y retenido empleadas en cada tamaño de agregado para satisfacer la curva granulométrica empleada.



Fig. 14 Dosificación de agregados para fabricación de mezcla asfáltica

3.5 Contenido óptimo de asfalto

Para obtener el contenido óptimo de asfalto se efectuaron pruebas Marshall, 3 probetas para cada porcentaje de asfalto distinto, utilizando porcentajes de 5%, 5.25%, 5.5%, 5.75%, 6%, 6.25% y 6.5 %.



Fig. 15 Dosificación de asfalto



Fig. 16 Compactación Marshall

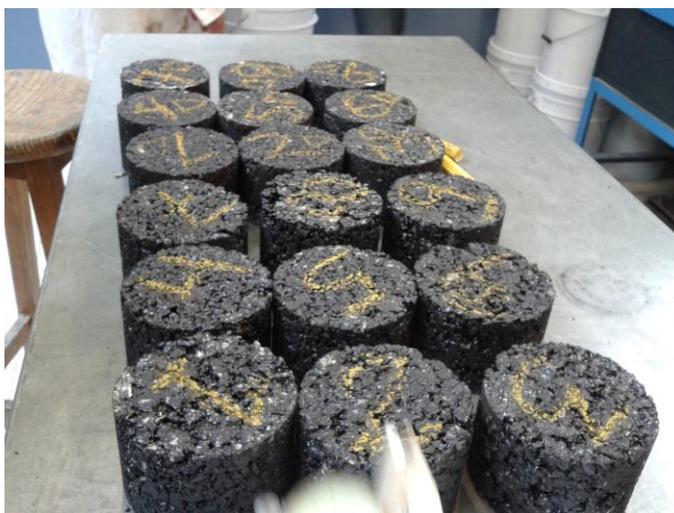


Fig. 17 Probetas Marshall

Referencia de la probeta		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
A	% asfalto sobre agregados	5,5	5,5	5,5	6	6	6	6,5	6,5	6,5	6,25	6,25	6,25
	% Asfalto sobre mezcla	5,6	5,6	5,6	6,1	6,1	6,1	6,6	6,6	6,6	6,3	6,3	6,3
B	Peso probeta en seco	1101,2	1152,7	1104,0	1102,4	1101,4	1101,8	1099,8	1100,4	1100,4	1097,2	1101,6	1098,7
	Peso probeta P.P.S.	1111,5	1126,7	1109,5	1103,8	1104,1	1104,0	1100,1	1100,7	1098,4	1096,4	1098,2	1097,5
D	Peso probeta saturada	614,6	641,9	617,1	626,1	621,6	614,4	623,2	624,9	624,3	621,1	623,0	624,6
	Densidad de la probeta	2,22	2,38	2,24	2,31	2,28	2,25	2,31	2,31	2,32	2,31	2,32	2,32
PROMEDIO		2,28			2,28			2,31			2,32		
H	Peso específico agregados	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
	$I=(100-A)/H$	34,98	34,98	34,98	34,79	34,79	34,79	34,61	34,61	34,61	34,70	34,70	34,70
J	Peso específico asfalto	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	$K=A/J$	5,39	5,39	5,39	5,88	5,88	5,88	6,37	6,37	6,37	6,13	6,13	6,13
L=100/(I+K)	Densidad teórica máx.	2,48	2,48	2,48	2,46	2,46	2,46	2,44	2,44	2,44	2,45	2,45	2,45
	$M=100-(G*I)$	22,49	16,83	21,58	19,72	20,58	21,71	20,21	19,97	19,68	19,91	19,56	19,38
PROMEDIO		20,30			20,67			19,95			19,62		
N=100-(100*G/L)	Huecos en la mezcla	10,54	4,01	9,49	6,14	7,15	8,47	5,51	5,23	4,89	5,76	5,36	5,14
	PROMEDIO	8,01			7,25			5,21			5,25		
O=(M-N)/M	Huecos rellenos de asfalto	0,531	0,762	0,560	0,689	0,653	0,610	0,727	0,738	0,752	0,710	0,726	0,735
	PROMEDIO	0,618			0,650			0,739			0,730		

Tabla 7. Muestra los resultados de las probetas con distintos porcentajes de asfaltos y la más conveniente es la que muestra un porcentaje de huecos en la mezcla de 5.25.

3.6 Fabricación de probetas

3.6.1 Manufactura de mezclas asfálticas

Una vez obtenido el porcentaje óptimo de asfalto junto con la curva granulométrica a utilizar se prosiguió con la elaboración de las placas, fabricando la mezcla asfáltica con una cantidad aproximada de 12200 gr. de agregado y 860 gr. de asfalto, estos dos elementos son mezclados de manera constante durante 4 minutos.



Fig. 18 Se muestra parte del proceso de elaboración de las placas de mezcla asfáltica, incluye el pesado de los agregados pétreos y del asfalto, así como el mezclado de estos mismos.

3.6.2 Compactación de mezclas asfálticas

Una vez manufacturada la mezcla asfáltica en caliente, se colocó en un molde de aluminio donde es distribuida uniformemente, para después colocar el molde con la mezcla asfáltica dentro del equipo de compactación y así, obtener la mezcla asfáltica compactada, la cual se cortara y se obtendrán las vigas a probar. (Fig. 19)



Fig. 19 Se muestra el llenado de un molde con la mezcla asfáltica, y éste colocándose en el equipo de compactación

Para llegar a la compactación óptima necesaria y así tener el porcentaje de huecos en la mezcla dentro de rango de la prueba Marshall, se realizaron varias pruebas a mezclas con distintas fuerzas y numero de pasada, y así se obtuvo la ideal.

PASO	FUERZA (KN)	NUM. DE PASADAS
1	2	4
2	5	4
3	8	4
4	15	4
5	20	4
6	25	5
7	28	10
8	30	13

Tabla 8. Muestra el número de pasadas y la fuerza aplicada en cada una para generar la energía de compactación adecuada para la mezcla asfáltica.

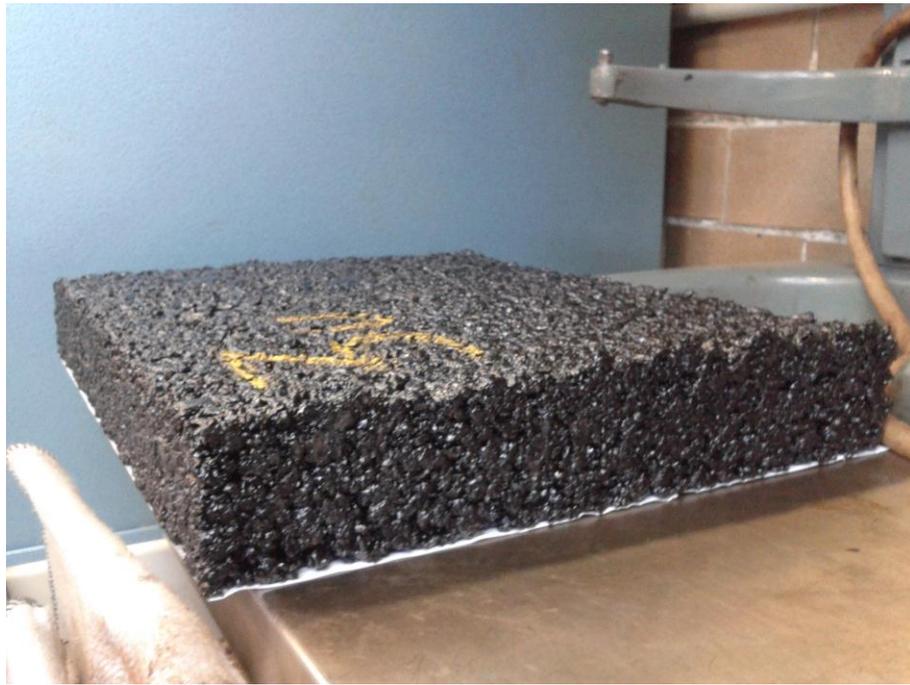


Fig. 20 Placa de mezcla asfáltica obtenida

En la figura 20 se muestra una placa de mezcla asfáltica terminada, dicha placa tiene unas dimensiones de 40x30x5cm.

Una vez fabricada la placa de mezcla asfáltica se somete a un proceso de acondicionamiento para obtener las vigas que se requieren en el ensayo de fatiga, a continuación se detalla el proceso de acondicionamiento.

3.7 Acondicionamiento de probetas

El acondicionamiento de los especímenes se deriva de varias etapas, como a continuación se muestra.

3.7.1 Serrado

Una vez elaborada la placa se desmolda y se marca con las medidas que establece la norma para cada espécimen, esto es 380 x 63 x 50 mm.

Cuando ya han sido marcadas los especímenes en cada placa se pasan al equipo de serrado y son cortadas una por una. (Fig. 21)



Fig. 21 Obtención de vigas a partir del corte de la placa de mezcla asfáltica

3.7.2 Pesos y dimensiones

Teniendo todas las vigas o especímenes cortados de las placas y agrupados por tipo de asfalto, se procede a pesarlas en seco y ser medidas con vernier (Fig. 22). Se toman 3 medidas de cada largo, alto y ancho.



Fig. 22 Toma de lecturas de pesos y dimensiones de cada viga

3.7.3 Densidades

Los especímenes cuando ya han sido pesados en seco son sumergidos en agua y pesados una vez que han transcurrido 3 minutos dentro del agua, se toma lectura (peso saturado), son retirados del agua y secados superficialmente y vueltos a pesar (peso superficialmente seco).(Fig. 23)

Cuando ya se han obtenido los valores anteriores se procede a la realización de los cálculos donde se obtienen densidades, huecos en la mezcla, etc.



Fig. 23 Cálculo de densidad en viga

3.8 Ensayo de probetas en dispositivo de cuatro puntos

3.8.1 Colocación de probetas y ambientación

La Norma AASHTO T 321-07 indica que las vigas a probar deben ser colocadas en un ambiente que este en $20,0 \pm 0.5$ ° C durante 2 horas para asegurar que la muestra se ambiente antes de iniciar la prueba.

A continuación se muestra el detalle de colocación de la viga dentro del dispositivo de ensayo.

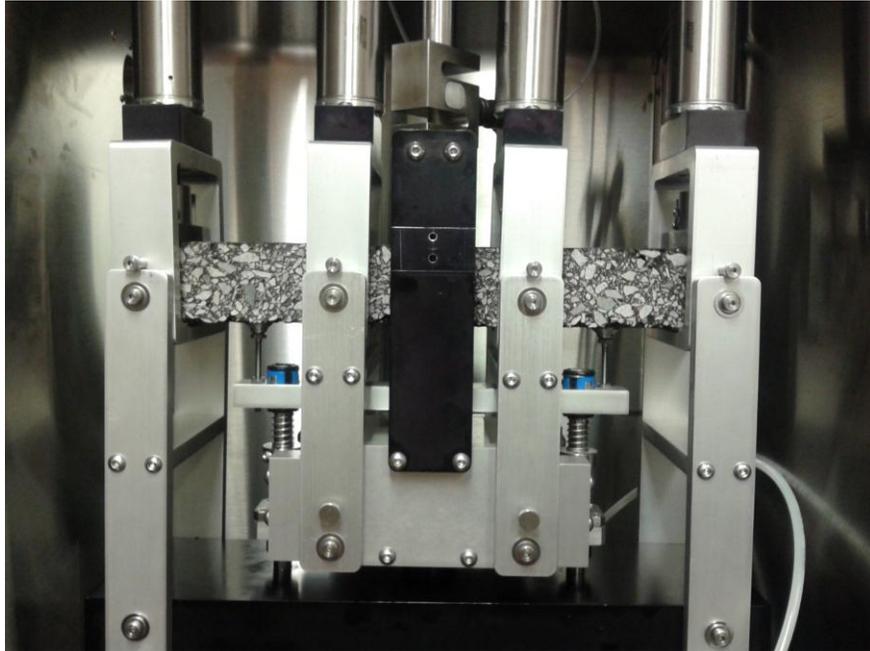


Fig. 24 Colocación de la viga en el dispositivo de ensayo



Fig. 25 Colocación del dispositivo dentro de la cámara ambiental

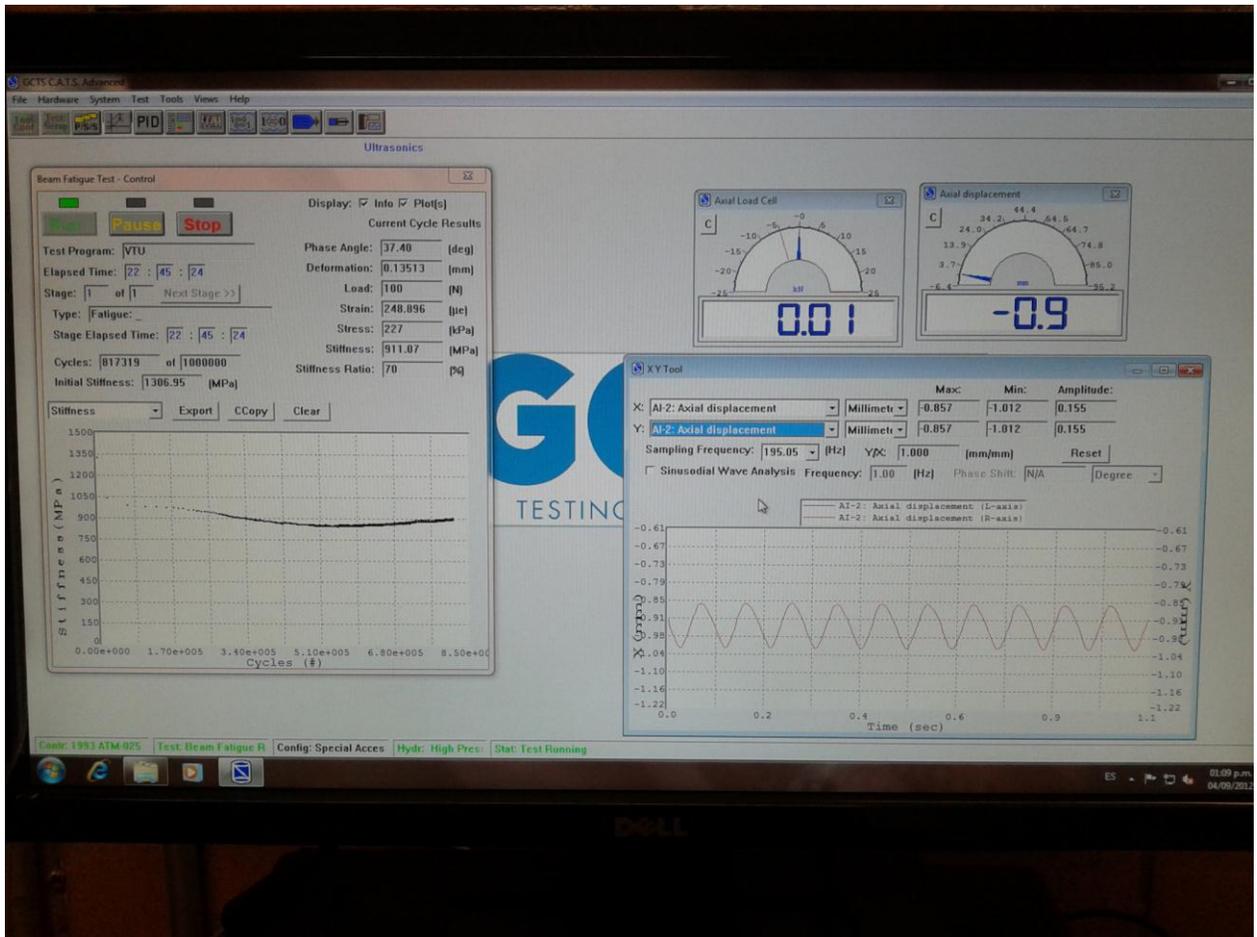


Fig. 26 Software de adquisición de datos de la prensa

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Ensayo de fatiga a cuatro puntos

4.1.1 Densidad aparente y contenido de huecos

Para obtener la densidad aparente y el contenido de huecos, las vigas son medidas en lo alto, ancho y espesor, son pesadas en seco para después tomar su peso sumergidas en agua, ya que se ha tomado el peso dentro del agua son secadas superficialmente para volverlas a pesar. En una hoja de Excel se incorporan los datos y se obtienen los huecos en la mezcla.

		PLACA 1 AC-20				PLACA 2 AC-20				PLACA 3 AC-20			
Referencia de la probeta		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
	% asfalto sobre agregados	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
A	% Asfalto sobre mezcla	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
B	Peso probeta en seco	2701.8	2720.9	2667.6	2473.6	2634.1	2672.8	2517.2	2518.5	2644.2	2780.4	2599.7	2698.1
C	Peso probeta P.P.S.	2717.8	2736.4	2686.1	2484.9	2645.1	2693.7	2500.9	2528.4	2658.3	2793.4	2639.2	2710.1
D	Peso probeta saturada	1546.0	1562.8	1523.3	1411.7	1498.2	1539.1	1410.7	1438.6	1515.6	1587.4	1513.7	1541.8
G=B/(C-D)	Densidad de la probeta	2.31	2.32	2.29	2.30	2.30	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
PROMEDIO		2.31				2.31				2.31			
H	Peso específico agregados	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
I=(100-A)/H	Volumen de agregados	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70
J	Peso específico asfalto	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
K=A/J	Volumen de asfalto	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
L=100/(HK)	Densidad teórica máx.	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
M=100-(G*I)	Huecos en los agregados	19.99	19.55	20.40	20.02	20.31	19.67	19.88	19.81	19.71	20.00	19.85	19.87
PROMEDIO		19.99				19.92				19.86			
N=100-(100*G/L)	Huecos en la mezcla	5.86	5.34	6.34	5.90	6.23	5.49	5.73	5.65	5.52	5.87	5.70	5.71
PROMEDIO		5.86				5.77				5.70			
O=(M-N)/M	Huecos rellenos de asfalto	0.707	0.727	0.689	0.705	0.693	0.721	0.712	0.715	0.720	0.706	0.713	0.712
PROMEDIO		0.707				0.710				0.713			

Tabla 9. Resultados de contenido de huecos en especímenes elaborados con asfalto convencional AC-20

		PLACA 4 Mod. 7022				PLACA 5 Mod. 7022				PLACA 6 Mod. 7022			
Referencia de la probeta		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
	% asfalto sobre agregados	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
A	% Asfalto sobre mezcla	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
B	Peso probeta en seco	2762.3	2700.5	2622.3	2617.9	2509.0	2597.4	2494.8	2679.1	2629.5	2701.2	2613.6	2409.2
C	Peso probeta P.P.S.	2777.6	2718.7	2635.8	2629.6	2528.9	2608.4	2516.1	2694.3	2642.5	2716.7	2632.6	2427.3
D	Peso probeta saturada	1586.1	1544.5	1497.1	1495.7	1439.9	1489.5	1433.2	1529.7	1503.2	1548.0	1497.3	1382.5
G=B/(C-D)	Densidad de la probeta	2.32	2.30	2.30	2.31	2.30	2.32	2.30	2.30	2.31	2.31	2.30	2.31
PROMEDIO		2.31				2.31				2.31			
H	Peso específico agregados	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
I=(100-A)/H	Volumen de agregados	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70
J	Peso específico asfalto	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
K=A/J	Volumen de asfalto	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
L=100/(I+K)	Densidad teórica máx.	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
M=100-(G*I)	Huecos en los agregados	19.56	20.20	20.09	19.89	20.06	19.45	20.06	20.18	19.91	19.80	20.12	19.99
PROMEDIO		19.93				19.94				19.96			
N=100-(100*G/L)	Huecos en la mezcla	5.35	6.10	5.98	5.74	5.94	5.22	5.94	6.08	5.77	5.64	6.01	5.86
PROMEDIO		5.79				5.79				5.82			
O=(M-N)/M	Huecos rellenos de asfalto	0.727	0.698	0.702	0.711	0.704	0.731	0.704	0.699	0.710	0.715	0.701	0.707
PROMEDIO		0.710				0.710				0.708			

Tabla 10. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado 7022

ESEPECIALIDAD EN VÍAS TERRESTRES

		PLACA 7 Mod. STY 82-22				PLACA 8 Mod. STY 82-22				PLACA 9 Mod. STY 82-22			
Referencia de la probeta		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
	% asfalto sobre agregados	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
A	% Asfalto sobre mezcla	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
B	Peso probeta en seco	2605.5	2665.2	2729.4	2751.8	2654.7	2681.6	2668.3	2612.1	2619.5	2883.7	2674.5	2454.4
C	Peso probeta P.P.S.	2621.7	2675.9	2740.8	2762.4	2667.1	2694.5	2676.2	2624.8	2633.3	2894.9	2685.6	2464.4
D	Peso probeta saturada	1496.0	1525.8	1556.8	1560.9	1504.7	1527.6	1527.8	1496.2	1500.9	1646.5	1522.2	1398.1
G=B/(C-D)	Densidad de la probeta	2.31	2.32	2.31	2.29	2.28	2.30	2.32	2.31	2.31	2.31	2.30	2.30
PROMEDIO		2.31				2.30				2.31			
H	Peso específico agregados	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
I=(100-A)/H	Volumen de agregados	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70
J	Peso específico asfalto	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
K=A/J	Volumen de asfalto	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
L=100/(I+K)	Densidad teórica máx.	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
M=100-(G*I)	Huecos en los agregados	19.69	19.59	20.01	20.53	20.75	20.26	19.38	19.69	19.73	19.85	20.23	20.13
PROMEDIO		19.95				20.02				19.99			
N=100-(100*G/L)	Huecos en la mezcla	5.50	5.39	5.88	6.49	6.76	6.18	5.14	5.51	5.56	5.69	6.14	6.02
PROMEDIO		5.82				5.89				5.85			
O=(M-N)/M	Huecos rellenos de asfalto	0.721	0.725	0.706	0.684	0.674	0.695	0.735	0.720	0.718	0.713	0.696	0.701
PROMEDIO		0.709				0.706				0.707			

Tabla 11. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado STY 82-22:

		PLACA 10 Mod. STY 76-22				PLACA 11 Mod. STY 76-22				PLACA 12 Mod. STY 76-22			
Referencia de la probeta		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
	% asfalto sobre agregados	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
A	% Asfalto sobre mezcla	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
B	Peso probeta en seco	2545.5	2720.5	2663.5	2673.0	2565.9	2644.4	2690.2	2699.5	2608.9	2712.7	2699.4	2649.5
C	Peso probeta P.P.S.	2558.3	2731.4	2674.1	2685.9	2578.9	2656.7	2700.5	2715.0	2619.9	2724.3	2710.6	2662.2
D	Peso probeta saturada	1453.1	1551.4	1525.6	1529.8	1467.1	1512.4	1542.3	1551.8	1489.1	1554.5	1536.4	1516.5
G=B/(C-D)	Densidad de la probeta	2.30	2.31	2.32	2.31	2.31	2.31	2.32	2.32	2.31	2.32	2.30	2.31
PROMEDIO		2.31				2.32				2.31			
H	Peso específico agregados	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
I=(100-A)/H	Volumen de agregados	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70
J	Peso específico asfalto	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
K=A/J	Volumen de asfalto	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13	6.13
L=100/(I+K)	Densidad teórica máx.	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45
M=100-(G*I)	Huecos en los agregados	20.08	20.00	19.53	19.77	19.92	19.81	19.40	19.47	19.94	19.53	20.23	19.76
PROMEDIO		19.85				19.65				19.87			
N=100-(100*G/L)	Huecos en la mezcla	5.97	5.87	5.32	5.60	5.77	5.65	5.17	5.25	5.81	5.32	6.14	5.58
PROMEDIO		5.69				5.46				5.71			
O=(M-N)/M	Huecos rellenos de asfalto	0.703	0.706	0.728	0.717	0.710	0.715	0.734	0.730	0.709	0.728	0.696	0.717
PROMEDIO		0.713				0.722				0.713			

Tabla 12. Resultados de especímenes elaborados con asfalto modificado STY 76-22.

4.1.2 Gráficos Modulo dinámico vs Numero de ciclos

A continuación se presentan las gráficas de la evolución del módulo dinámico para cada una de las vigas ensayadas y para cada asfalto considerado en el estudio.

El módulo dinámico es la relación de esfuerzo contra deformación bajo condiciones vibratorias, en este caso calculado de los datos obtenidos de las pruebas de flexión, esta es una de las propiedades de los materiales visco-elásticos.

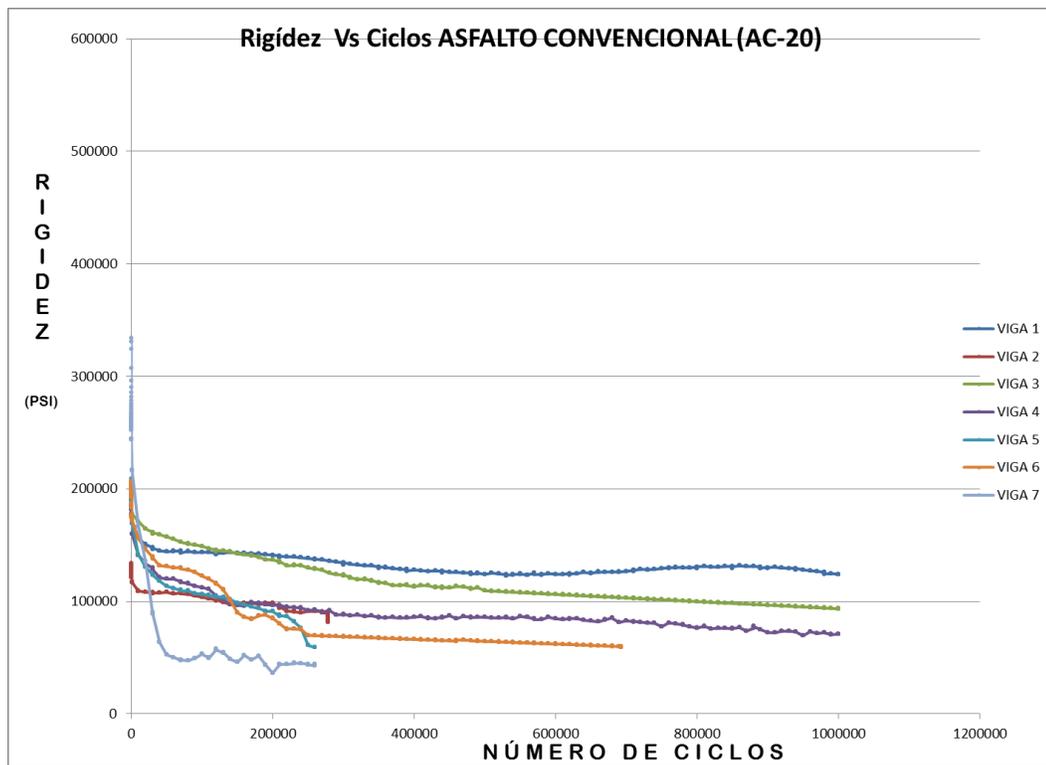


Fig. 27 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto convencional AC-20 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga.

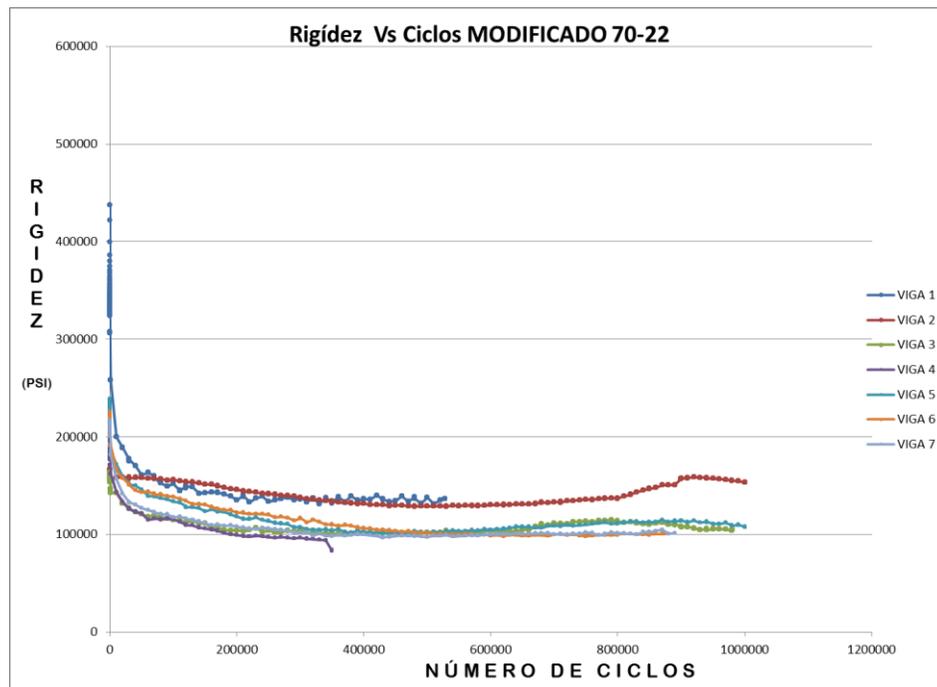


Fig. 28 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado 70-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga.

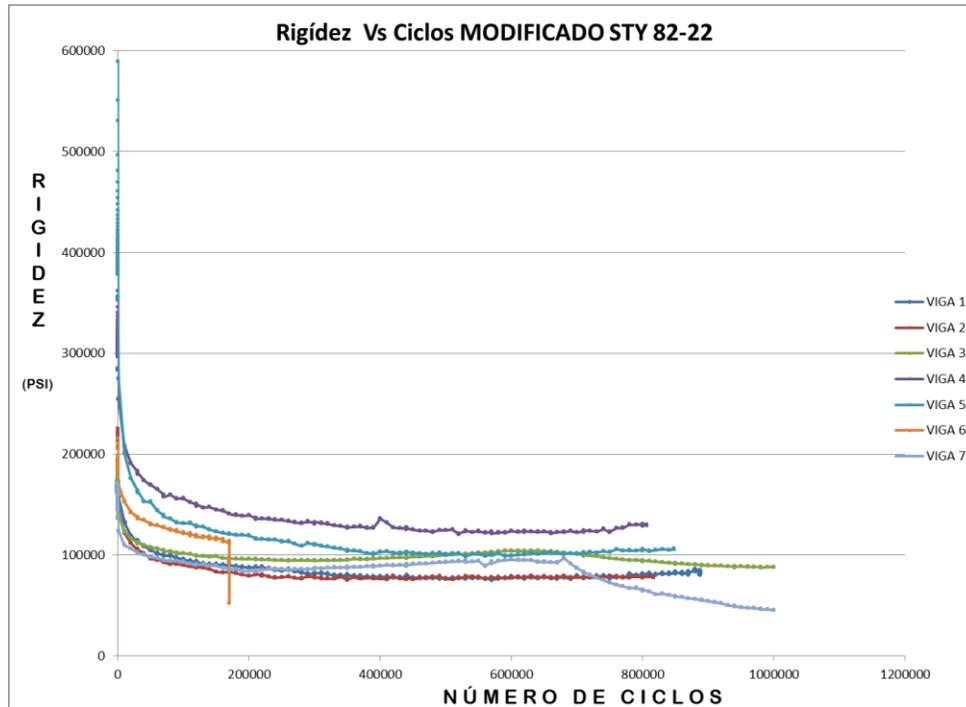


Fig. 29 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado STY 82-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga.

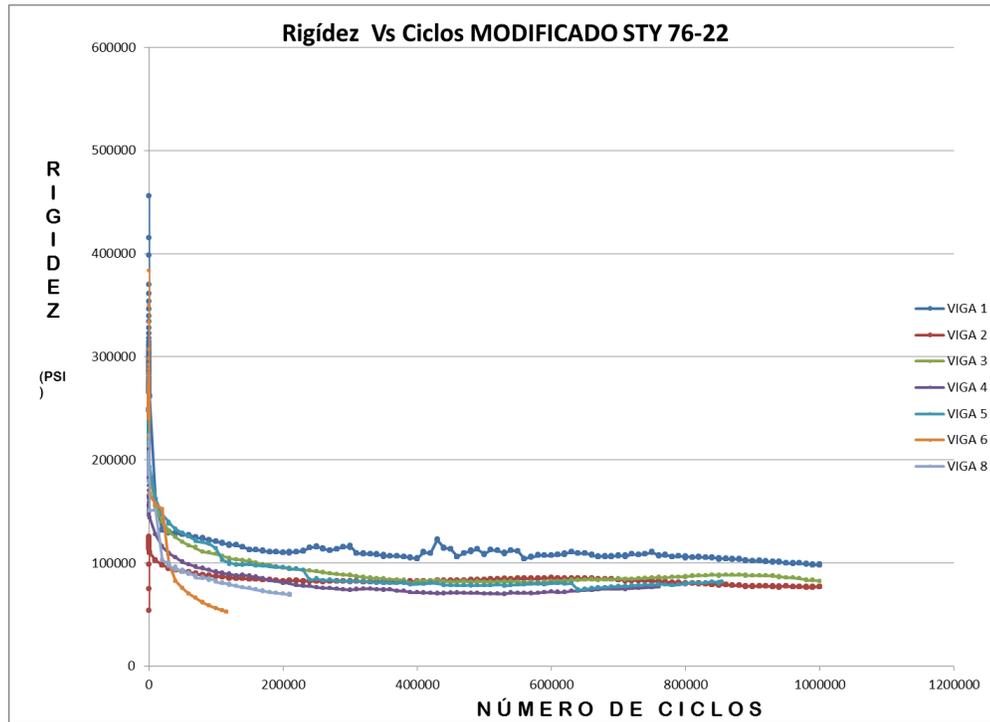


Fig. 30 Comportamiento de las probetas elaboradas con asfalto modificado STY 76-22 que responde a su módulo dinámico a medida que se presentan los ciclos de carga.

Del análisis de las curvas de evolución del módulo de rigidez también llamado módulo dinámico se puede observar que las curvas obtenidas para el asfalto AC-20 presentan una pendiente descendente conforme aumentan los ciclos de fatiga mientras que en las curvas de los asfaltos modificados el módulo desciende hasta un cierto valor y después la curva se mantiene constante (sin caída) con la acumulación de ciclos.

Este es un primer indicador de que las mezclas fabricadas con asfaltos modificados presentan en general un mejor comportamiento que las mezclas fabricadas con un asfalto convencional.

En la siguiente tabla se presentan los valores de módulo de rigidez obtenidos:

Clasificación de asfalto	Módulo de rigidez (kg/cm ²)
AC-20	23,200
STY 70-22	30,582
STY 76-22	32,340
STY 80-22	41,480

Tabla 13. Módulos de rigidez obtenidos

4.1.3 Gráficos Energía vs Numero de ciclos

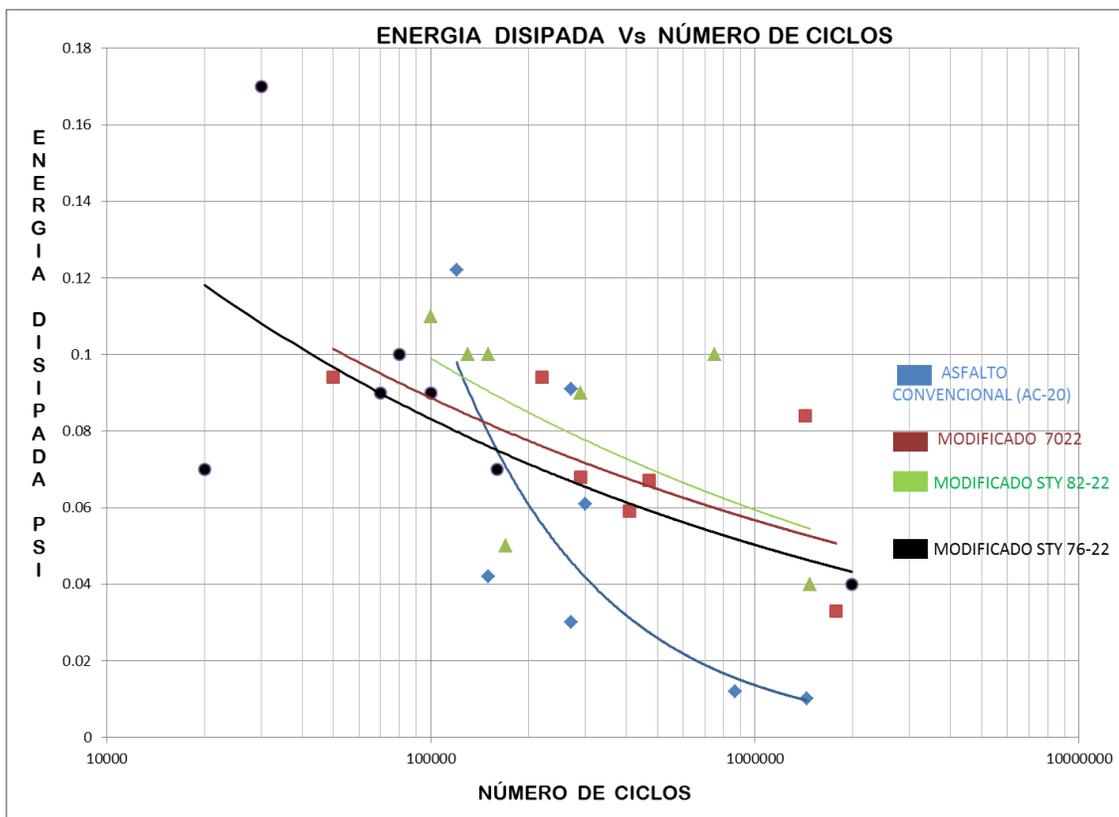


Fig. 31 Gráfica de energía disipada

Al analizar las curvas de energía disipada se observa que el asfalto convencional presenta una disminución considerable, en comparación con los asfaltos modificados, es decir, se requiere

menos energía para poder fisurar por fatiga una mezcla asfáltica fabricada con asfalto AC-20 en comparación con las fabricadas con asfaltos modificados.

Esto es un indicador de que las mezclas fabricadas con asfaltos modificados tendrán una mayor “vida útil” de servicio. Esto se debe comprobar al analizar las leyes de fatiga que a continuación se presentan.

4.1.4 Leyes de fatiga

Para la obtención de las leyes de fatiga, como las expuestas a continuación, se emplean expresiones matemáticas como las vistas en el capítulo 2.3.3 y la realización de estudios de comportamiento a escala como los realizados en este trabajo.

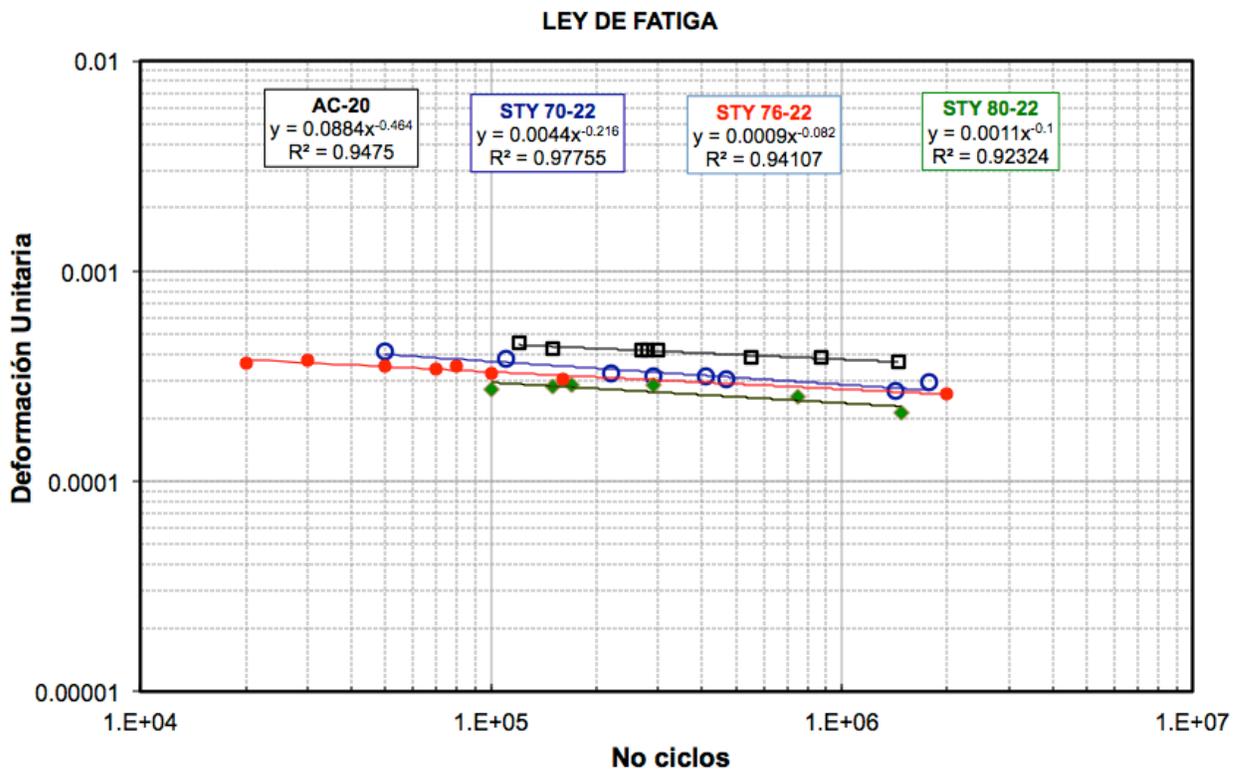


Fig. 32 Leyes de fatiga

Como se observa en las leyes de fatiga, la mezcla asfáltica fabricada con asfalto AC-20 se puede considerar la menos resistente a la fatiga ya que presenta un mayor nivel de deformaciones. En segundo termino se ubica la mezcla fabricada con el asfalto STY 70-22 seguido por la mezcla fabricada con STY76-22 y finalmente, la mezcla más resistente a la fatiga es la fabricada con el asfalto STY 80-22.

Como un ejemplo, si nos situamos en el número de ciclos $1.E+06$ e intersectamos las leyes de fatiga, para el asfalto AC-20 se obtiene una deformación de 0.00039, en cambio, para el asfalto STY 80-22 se obtiene 0.00021, casi un 50% menor.

4.2 Ejemplo de aplicación

En base a los módulos de rigidez obtenidos de los ensayos experimentales, se realiza una corrida en el programa de Diseño de Pavimentos DISPAV considerando la misma estructura de pavimento únicamente se cambiaran los módulo de rigidez obtenidos.

Para este ejemplo se empleara la mezcla asfáltica con AC-20 de módulo $E=23,200 \text{ kg/cm}^2$ y la mezcla con STY 80-22 de módulo $E=41,480 \text{ kg/cm}^2$.

Los datos de entrada utilizados son:

- Camino de altas especificaciones tipo A
- Tránsito de 25 millones de ejes estándar
- Nivel de confianza de 85%

Los resultados obtenidos son:

Para mezcla con asfalto AC-20

Capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm ²)	V (poisson)	Vida Previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	13.0		23,200	0.35		> 150
Base asf	15.0		16,000	0.35		> 150
Base granular	30.0	100	4,000	0.40	> 150	
Sub-base	35.0	30	1,800	0.45	> 150	
Terraceria	Semi-inf	5	600	0.45	27.3	

Para mezcla con asfalto STY 80-22

Capa	H (cm)	VRSz (%)	E (kg/cm ²)	V (poisson)	Vida Previsible	
					Deformación	Fatiga
Carpeta	10.0		41,480	0.35		> 150
Base asf	15.0		16,000	0.35		119.3
Base granular	30.0	100	4,000	0.40	> 150	
Sub-base	35.0	30	1,800	0.45	> 150	
Terraceria	Semi-inf	5	600	0.45	23.2	

Al comparar las estructuras obtenidas se obtiene una disminución de 3cm en el espesor de carpeta asfáltica empleando el asfalto STY 80-22, esta reducción influye de manera importante en el costo final de una carretera.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Para concluir con este trabajo de investigación se considera que los resultados obtenidos en el laboratorio de Vías terrestres del Instituto de Ingeniería de la UNAM, permiten caracterizar los elementos de las mezclas asfálticas, y teniendo parámetros de aceptación que dictan las normas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes, (con las que se basó este trabajo de investigación), se pudo obtener mezclas asfálticas adecuadas para la realización de las pruebas de fatiga a cuatro puntos.

Todas las mezclas realizadas en este trabajo, tanto las elaboradas con asfalto convencional como con los tres distintos asfaltos modificados, se realizaron con la misma curva granulométrica y el mismo porcentaje de asfalto, así que las variaciones en los resultados son, específicamente, por la capacidad de respuesta dadas, de cada uno de los asfaltos debido a sus distintos componentes químicos.

Con esto se demostró que la capacidad de soportar más ciclos de carga y por tanto más resistencia a las fisuras por fatiga las presentan los asfaltos modificados. El asfalto que mostro mejor comportamiento a la fatiga es el STY 80-22, seguido por los asfaltos STY 76-22 y STY 70-22, finalmente el AC-20.

Los resultados obtenidos experimentalmente en este trabajo sobre la resistencia a fatiga en laboratorio en una mezcla asfáltica es generalmente menor a la que se presenta en una carpeta asfáltica en una carretera, ya que existe, en esta última, un periodo de reposo aleatorio entre las aplicaciones constantes de carga que le permiten al material recuperarse, mientras que las pruebas en laboratorio se produjeron sin ningún reposo.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Mexicano del Transporte, 1998 “ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO”, publicación técnica N° 108, Sanfandila, Querétaro.
- [2] Dahlhaus Enrique, 2012 “Apuntes de la Especialidad en Vías Terrestres”, Posgrado de Ingeniería.
- [3] Zarate Manuel, 2012 “Apuntes de la Especialidad en Vías Terrestres”, Posgrado de Ingeniería.
- [4] AEPO S.A. Ingenieros Consultores, 2001 “Calculo de leyes de fatiga de mezclas bituminosas”, Área de estudios especiales.
- [5] Corona Pedro, 2012 “Apuntes de la Especialidad en Vías Terrestres”, Posgrado de Ingeniería.
- [6] Asphalt Institute 1996, “Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE”.
- [7] Úrsula Vázquez Hernández, 2012, “Practicas de campo realizadas en la autopista México – Querétaro”, Abril del 2012.
- [8] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2003 “Distress Identification Manual”. Cap. 1.
- [9] Garnica Paul, Gómez José A., Sesma Jesús A. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica N° 197, Sanfandila, Qro., 2002.
- [10] Monismith, C.L., et al. (1975). “Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading”. Transportation Research Record No. 537, pp. 1-38.
- [11] Imágenes tomadas de internet: <http://www.actiweb.es/selladorasfaltico/>

- [12] Little, Dallas N., et al. (1995). "Identification of the Structural Benefits of Base and Subgrade Stabilization". Research Report 1287-2. Texas Transportation Institute. U.S.A.
- [13] <http://www.camineros.com/docs/cam023.pdf>. calculo de leyes de fatiga de mezclas bituminosas. AEPO. S.A. Ingenieros consultores. Área de Estudios Especiales. Mayo 2001. Pag. 2
- [14]http://www.cooper.co.uk/info/index.asp?page=crt_2pt_two_point_trapezoidal_bending_beam_machine_83_ES, Cooper Technology, CRT-2PT Equipo de flexión en 2 puntos sobre probetas trapezoidales.
- [15] <http://www.mastrad.com/crtest.pdf>, Métodos de ensayo sobre mezclas asfálticas en laboratorio.
- [16] Jesús A. Hernández. 2009 "Efecto de la Cohesión y Tenacidad del Betún en el Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas". Cap. 2.
- [17] 2009. "Ensayo de Fatiga en Flexotracción Dinámica de Mezclas Bituminosas". España.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials, Norma AASHTO Designation: T 321-07, "Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending".