



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN
MEZCLAS ASFÁLTICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

PRESENTA:

JOSÉ EDUARDO GARCÍA SERVÍN

Director de Tesis

Dr. Mario Salazar Amaya

MORELIA, MICH. ABRIL DEL 2013



AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por haberme permitido llegar hasta este momento y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de permitirme estar dentro de una FAMILIA llena de infinita bondad y amor.

A mis Padres:

Ma. Alicia Servín Cortés y José Ignacio García Méndez por darme la vida y el amor que siempre he tenido y que me da fortaleza para salir siempre adelante, por todos esos consejos que siempre me han dado, comprensión y apoyo para esos momentos difíciles por los cuales he pasado a lo largo de la vida y que gracias a su ayuda he podido superar. Por todos los regañones que me dieron a tiempo ya que me han servido para no cometer los mismos errores dos veces y que me han permitido que pueda llegar a ser una persona de bien. En otras palabras todo lo que tengo y que he logrado se los debo a Ustedes Papás porque sin ustedes no sería nadie. Muchísimas Gracias por todo y saben que mis logros también son suyos y gracias a Ustedes. Los Quiero.

A mi Novia:

Norbella Sánchez Sotomayor por estar a mi lado en los momentos de alegrías y de tristezas, siempre también apoyándome al igual que mis padres, gracias por todas esas palabras de aliento que siempre me has brindado y que nunca han faltado, por la paciencia que presentas en todo momento, por el amor que me brindas y que me da fuerzas para salir siempre adelante. Te Amo.

A mis Familiares:

A toda mi Familia, no puedo hacer excepciones, todos han estado para apoyarme en todo momento y si hoy consigo este logro también debo agradecerles a Ustedes que han apoyado mi persona infinitamente. Muchas Gracias.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo:

Por darme la oportunidad de pertenecer a esta gran Institución desde mis estudios de Preparatoria y posteriormente de Licenciatura. Porque en todo momento me han formado académicamente de la mejor manera. En especial a **la Facultad de Ingeniería Civil**, por darme la formación y que gracias a sus instalaciones y profesores he logrado realizar esta meta que me planteé hace algunos años. Muchas Gracias.

A mis Profesores:

Los cuales me transmitieron sin ninguna excusa sus conocimientos durante toda mi formación académica. Porque gracias a ellos puedo presumir todos mis conocimientos adquiridos en mi Profesión. En especial quiero dar las Gracias a mi Profesor y Asesor de Tesis el **Dr. Mario Salazar Amaya**, porque gracias a sus recomendaciones realice una estancia de investigación en uno de los Institutos de Investigación más Importantes del País (IMT) en donde aprendí muchas cosas en cuanto a mi profesión se refiere. Muchas Gracias.

A mis Compañeros y Amigos:

Los cuales han sido de gran apoyo durante toda mi formación. En especial quiero dar las Gracias a mis grandes Amigos **Cesar Guzmán, Julio Cesar Bucio y Said García** así como también a sus Familias ya que siempre me apoyaron en la licenciatura. Muchas Gracias.

Al Instituto Mexicano del Transporte (IMT):

Por haberme dado la posibilidad de poder permanecer en la estancia de investigación tanto de Servicio Social como de Tesis y brindarme el apoyo tanto del comedor como del transporte. Al **Dr. Paul Garnica Anguas**, que hizo posible mi acercamiento con el Laboratorio de Infraestructura dentro del Instituto. En especial al **Dr. Horacio Delgado Alamilla** que sin su Apoyo, Paciencia, Comprensión, Asesorías y Conocimiento Transmitido no hubiese logrado lo que hoy presento. A mis compañeros y Amigos **M. en I. Mayra Flores, Ing. Francisco Romero, Ing. Aldo Salazar, Ing. Vicente Aragón, M. en I. Roberto Hernández, M. en I. Antonio Gómez y Técnico Alberto Zea**, que Gracias a ellos logré y conocí muchísimas cosas que hasta su momento desconocía y que siempre me brindaron un apoyo incondicional. Muchas Gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN:	1
ABSTRACT:	2
INTRODUCCIÓN	3

CAPÍTULO 1 PROBLEMÁTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

DEFINICIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	5
COMPORTAMIENTO DEL LIGANTE ASFÁLTICO	6
COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS MINERALES	8
PROBLEMÁTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	10
AGRIETAMIENTO POR BAJA TEMPERATURA	10
AGRIETAMIENTO POR FATIGA	11
DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	13
RODERAS	13
TIPOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE	14
VISCOELASTICIDAD	16
TIPO DE COMPORTAMIENTO	16

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC

ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC	18
PROTOCOLO AMAAC	20
CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO	20
PROTOCOLO AMAAC NIVEL I	22

DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	22
CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	26
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS	30
SEGUIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CONTENIDO ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS HASTA EL NIVEL II	33
SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	34
PROTOCOLO AMAAC NIVEL II	36
SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE	36
PROTOCOLO AMAAC NIVEL III	39
MÓDULO DINÁMICO	39
PROTOCOLO AMAAC NIVEL IV	40
FATIGA	40

CAPÍTULO 3 FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	42
INTRODUCCIÓN A LA FATIGA	42
HISTORIA	42
CURVAS DE WÖHLER	42
TEORÍAS SOBRE LA FATIGA	45
MECANISMOS DE FALLA	46
ENSAYO DE FATIGA EN EL ACERO	47
ENSAYO DE FATIGA EN EL CONCRETO	50
PRUEBA DE LA DETERMINACIÓN A LA FLEXIÓN	50

CAPÍTULO 4 ENSAYOS DE FATIGA EN LABORATORIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ENSAYO DE FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	53
CURVA S-N (TENSIÓN-NÚMERO DE CICLOS)	53
ENSAYOS DE FATIGA EN LABORATORIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	55
MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA (MÉTODO BRASILEÑO)	56
MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 2 PUNTOS	58
MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 3 PUNTOS	59
MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 4 PUNTOS	60
FLEXIÓN CON APOYO	61
MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN DIRECTA	61
MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN-COMPRESIÓN	63
ENSAYO TRIAXIAL	64
MODO DE SOLICITACIÓN	65
TIPO DE SEÑAL	66

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ANÁLISIS DE LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	67
CRITERIOS DE EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ	67
CRITERIO CLÁSICO DE FATIGA	67
CRITERIO DE FRACTURA	68
CRITERIO DE LA CURVA DE WEIBULL	68
PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASONORAS (US)	68
ENFOQUES EN TÉRMINOS DE DAÑO	69

ÍNDICE DE DAÑO	71
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS	73
EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE LA MEZCLA	73
CAPÍTULO 6 EJEMPLO PRÁCTICO	
EJEMPLO PRÁCTICO	75
PRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS	82
ANEXOS	
ANEXOS 1 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA FALLA POR FATIGA DEL CONCRETO ASFÁLTICO COMPACTADO SOMETIDO A FLEXIÓN REPETIDA. ASTM D7460-08	89
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	112
RELACIÓN DE FIGURAS	114
RELACIÓN DE GRÁFICAS	119
RELACIÓN DE TABLAS	121
SIGLAS	123
BIBLIOGRAFÍA	124

RESUMEN:

Sabemos que la mezcla asfáltica presenta susceptibilidad a la deformación permanente o roderas, fisuración térmica y a la fisuración por fatiga. El fenómeno de la fatiga es una de las principales fallas que presenta un pavimento, este fenómeno se ha estudiado con entusiasmo en Europa y Estados Unidos, estos países cuentan con diversos criterios de análisis, así como diversos métodos de ensayo para determinar su vida útil, sin embargo aún se sigue definiendo un tipo de ensayo o un criterio de análisis de manera consensuada.

Este trabajo se enfoca en los diferentes criterios y tipos de análisis existentes de un ensayo de fatiga en laboratorio. Se presenta una descripción de cada criterio y su análisis, además de ciertas recomendaciones que se deben de tomar en cuenta para realizar este ensayo y así obtener resultados confiables. El ensayo se realizó en el Laboratorio de Asfaltos y Mezclas Asfálticas de las Instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), con un equipo de análisis de viga en flexión de 4 puntos.

ABSTRACT:

We know presents the asphalt mixture susceptibility to permanent deformation or rutting, cracking and thermal fatigue cracking. The phenomenon of fatigue is a major fault that has a floor, this phenomenon has been studied enthusiastically in Europe and the United States, these countries have different criteria analysis and various methods of testing for life, however still continues to define the type of test or analysis criteria by consensus.

This work focuses on the different types of analysis criteria and existing in a fatigue test laboratory. A description of each criterion and analysis, and presents some recommendations that should be taken into account for this test and get reliable results. The trial was conducted in the Laboratory of Asphalt and Asphalt Mixture Facility Mexican Institute of Transport (IMT), a beam analysis team in 4-point bending.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se trata el tema de la Evaluación de la Resistencia a la Fatiga en las Mezclas Asfálticas. Sabemos que las carpetas asfálticas son susceptibles a presentar diversos problemas, los cuales hacen que los pavimentos presenten fallas visibles. Entre las principales fallas podemos encontrar la deformación permanente (roderas), las grietas por fatiga o piel de cocodrilo, fisuración térmica, etc. La fisuración por fatiga es uno de los problemas que más se presentan en los caminos del país y que poca importancia se le da en algunas ocasiones, así que en el transcurso de esta investigación se podrá explicar cómo se presenta, como se desarrolla y como podremos evitar dicho problema para en el futuro construir infraestructura de transporte capaz de dar una seguridad y confort a los usuarios que son los que en primera instancia sufren dichas consecuencias.

Se pretende expresar la importancia que se le debe dar al fenómeno de la fatiga en mezclas asfálticas para el diseño de pavimentos, sabemos que es un problema actual que presenta nuestro país, por lo tanto se realizaran algunas comparaciones con laboratorios de países europeos y americanos en cuanto a los estudios de fatiga se refiere, equipo de trabajo y en que normas se basan para realizar pavimentos de calidad.

Además se presentan las consecuencias que ocasiona el no tener un buen control desde la elección del material con el cual se ira a construir el pavimento, ya que como sabemos una mezcla asfáltica está conformada por dos materiales muy importantes; Agregados minerales y Asfalto este último puede estar en modo natural o modificado, generalmente los asfaltos se combinan con alguna clase de polímero para mejorar su comportamiento. Se mencionaran las diversas pruebas para poder determinar si los agregados minerales y el asfalto en alguna de su modalidad son aptos para ser utilizados en la creación de un pavimento, además de quien y como regulan todos los criterios y recomendaciones que los laboratorios del país siguen para poder determinar las características de los materiales utilizados en la construcción de una mezcla asfáltica, también se podrá observar de manera detallada cuales son los ensayos o pruebas que se deben realizar a los materiales según el nivel al que vayan a ser solicitados, para poder asegurar que se estarán utilizando materiales de calidad, lo cual se verá reflejado en una buena estructura del pavimento y en un costo-beneficio a corto plazo.

Presentándose además los primeros estudios realizados de la fatiga, principalmente en otros materiales diferentes a las mezclas asfálticas, como el concreto y el acero, este último siendo el principal referente de muchos autores para poder presentar sus teorías y modelaciones. También se incluye una reseña histórica de cómo han evolucionado los ensayos y teorías de la fatiga en los materiales antes mencionados, hasta llegar el momento donde se requirió analizar las mezclas asfálticas por esta modalidad. Podremos conocer sus mecanismos de falla y los ensayos que se aplican para conocer la vida útil a la fatiga de los materiales.

Así mismo se mencionaran los diferentes tipos de ensayos para conocer la vida a la fatiga de las mezclas asfálticas, conoceremos sus características, encontraremos los ensayos que realizan otros países y se hará una comparativa con nuestro país. Observaremos cómo se realizan, cuales son las especificaciones con las que se debe de contar y se explicará cuáles son los modos de sollicitación a los cuales se puede ensayar una mezcla asfáltica para obtener su vida a la fatiga. Se describirá el tipo de señal que representa de mejor manera el ensayo.

Dentro del análisis de la fatiga en las mezclas asfálticas sus criterios de evolución del módulo de rigidez presentan una gran importancia ya que se incluyen tres casos de análisis, se describirán cada uno de ellos y cuáles son los parámetros utilizados en cada uno. Además se observará como se transforma todo a enfoques de daño y así poder visualizar como se representan en forma gráfica los resultados del ensayo de fatiga y decir cómo se comportó nuestro espécimen en el transcurso de la prueba.

Para poder ejemplificar lo descrito en líneas anteriores acerca de los ensayos tomaremos de base el ensayo de flexión en viga de 4 puntos (Utilizado en México) para poder realizar una representación de la prueba en el laboratorio, así sabremos cómo se realiza el ensayo y cuál es el comportamiento de nuestro material al ser evaluado al ensayo de fatiga. Presentaremos los resultados que arroja el equipo GCTS, su representación gráfica y podremos concluir cómo se comporta el espécimen ante este fenómeno.

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

CÁPITULO 1

PROBLEMÁTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

DEFINICIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Antes de hablar de la problemática de las mezclas asfálticas comenzaremos a describir primeramente lo que es una mezcla asfáltica que en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utilizan para construir pavimentos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente, el rendimiento de la misma.

La mezcla asfáltica debe ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, etc. Debe ser resistente a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Cada una de éstas y otras propiedades deseables de las mezclas asfálticas.

Estas mezclas asfálticas pueden ser elaboradas en plantas y en laboratorios con los equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento. [1]

En otras palabras podremos decir que una mezcla asfáltica se define sencillamente como:

MEZCLA ASFÁLTICA = ASFALTO + AGREGADOS MINERALES + ADITIVOS

El asfalto es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura a la que esté sometido; a temperatura de ebullición del agua tiene una consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad. Se utiliza muy frecuentemente en el rubro de la pavimentación de carreteras y calles, también para impermeabilizar estructuras como bodegas y techos.

El asfalto se caracteriza porque es un material aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede reblandecerse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. [2]

El agregado mineral o esqueleto de la mezcla con ciertas características de resistencia, durabilidad y graduación, al ser ligado por el material asfáltico actúa como una estructura pétreo que aporta resistencia y rigidez a la mezcla.

Al incluir, tanto ligante asfáltico como material pétreo al concreto asfáltico, su comportamiento se afecta por las propiedades individuales de cada componente, y por la interrelación de estos dentro del sistema, que dependen de las características individuales de los materiales que lo componen.

COMPORTAMIENTO DEL LIGANTE ASFÁLTICO

La más importante característica del ligante asfáltico, muchas veces una ventaja, y a veces una desventaja, es su susceptibilidad térmica. Otro aspecto que influye de manera determinante en el comportamiento del ligante es el tiempo de aplicación de la carga. Como el comportamiento del cemento asfáltico es dependiente de la temperatura y de la duración del tiempo de aplicación de la carga (Figura 1), ambos factores pueden intercambiarse. Es decir, una baja velocidad de carga puede simularse con temperaturas elevadas, y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas. Por ello, los ensayos de caracterización de los cementos asfálticos deben especificar la temperatura y la velocidad de aplicación de carga, para que los resultados del ensayo sean efectivamente interpretados.

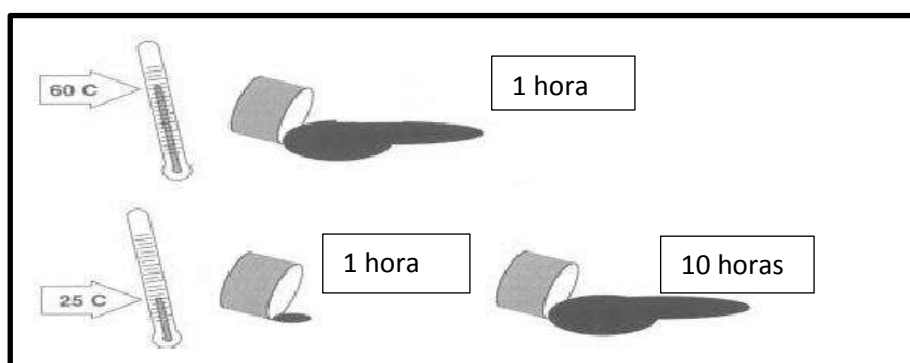


Figura 1. Dependencia del Tiempo-Temperatura del Cemento Asfáltico.

El cemento asfáltico es un material visco-elástico porque exhibe simultáneamente características viscosas. A altas temperaturas (mayor a 100 °C), el cemento asfáltico actúa casi como fluido viscoso, y a muy baja temperatura (menor a 0° C) se comporta como un sólido elástico. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista en el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de ambos estados, un fluido viscoso y un sólido elástico (Figura 2). Esta característica se menciona ampliamente en el apartado de Viscoelasticidad.

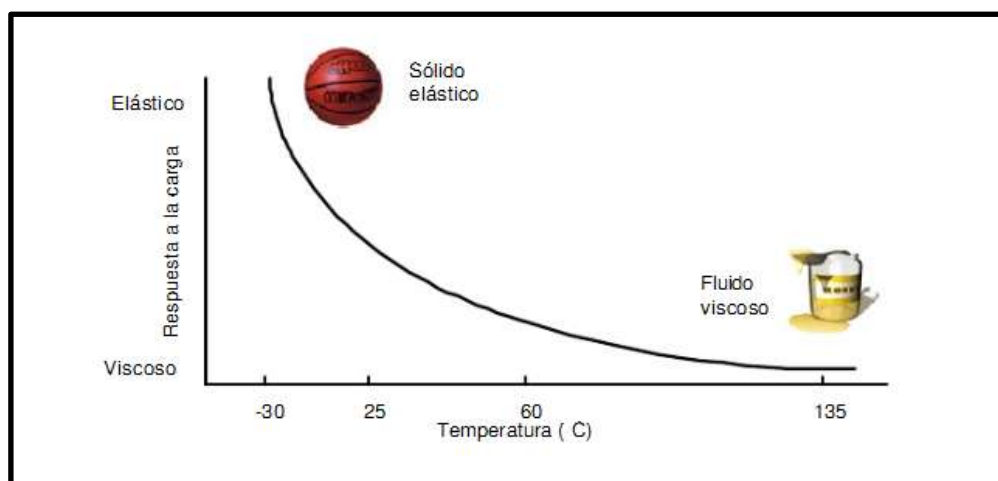


Figura 2. Comportamiento Visco-Elástico del Cemento Asfáltico.

Al estar compuesto de moléculas orgánicas, el cemento asfáltico reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina “oxidación”, y cambia la composición y la estructura de las moléculas de asfalto, haciendo más dura y frágil la estructura del asfalto dando origen al “endurecimiento por envejecimiento”.

La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas; es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar la mezcla asfáltica para permitir la elaboración, mezclado y compactación.

Éste es también el motivo por el cual la oxidación es más crítica en cementos asfálticos utilizados en pavimentos en climas cálidos y desérticos. Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando el desempeño de la carpeta asfáltica a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades; la mayoría de ellos intenta reducir la susceptibilidad a la temperatura, al endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y a la humedad de la mezcla.

COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS MINERALES

Independientemente de la fuente (métodos de procesamiento u origen mineralógico) se espera que el agregado provea un esqueleto pétreo resistente y durable que permita tolerar las repetidas aplicaciones de carga. Agregados de textura rugosa, de buena cubricidad, dan más resistencia que los redondeados. Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte trabazón de las partículas, a diferencia de lo que ocurre con las partículas redondeadas, ya que tienden a deslizarse unas sobre otras (Figura 3).

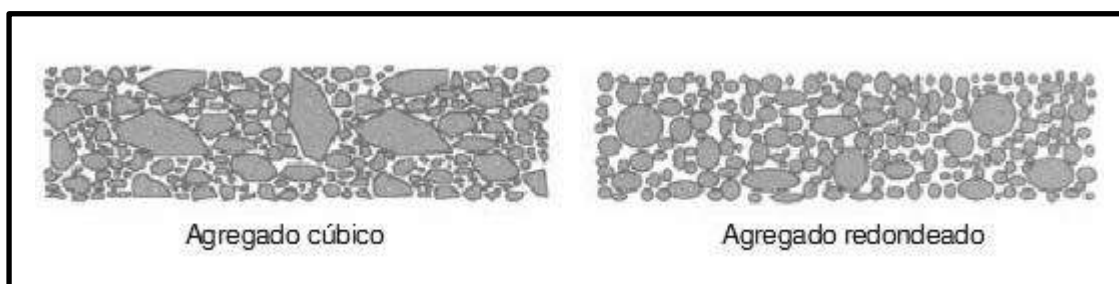


Figura 3. Estructura Pétreo de la Mezcla.

Cuando una masa de agregados es cargada (Figura 4), puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto a otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano, donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado pétreo es de crítica importancia en el desempeño de una carpeta asfáltica, ya que provee en gran medida la resistencia a la deformación permanente de la mezcla.

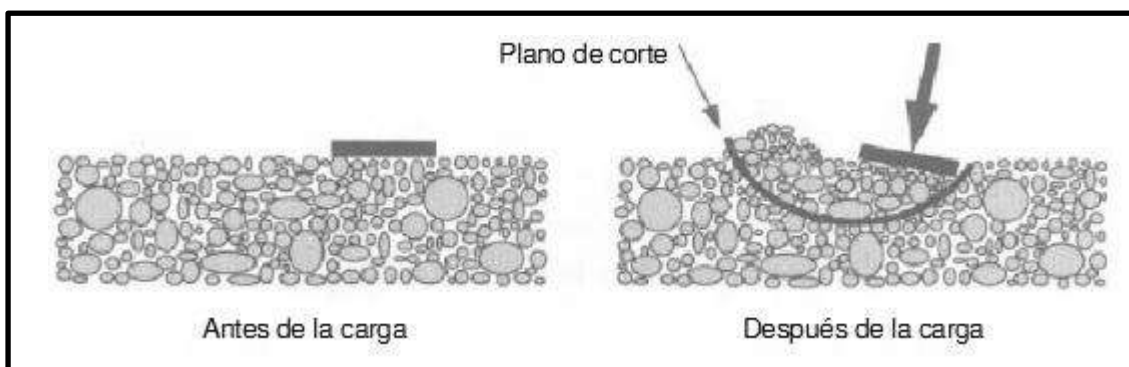


Figura 4. Comportamiento del Agregado a la Carga de Corte.

El comportamiento a la resistencia al corte de los agregados con superficies fracturadas y de los agregados lisos se puede observar fácilmente en las pilas de acopio, donde los agregados triturados forman pilas más empinadas y estables que los redondeados (Figura 5). Los ángulos de reposo son mayores en los materiales con caras fracturadas.

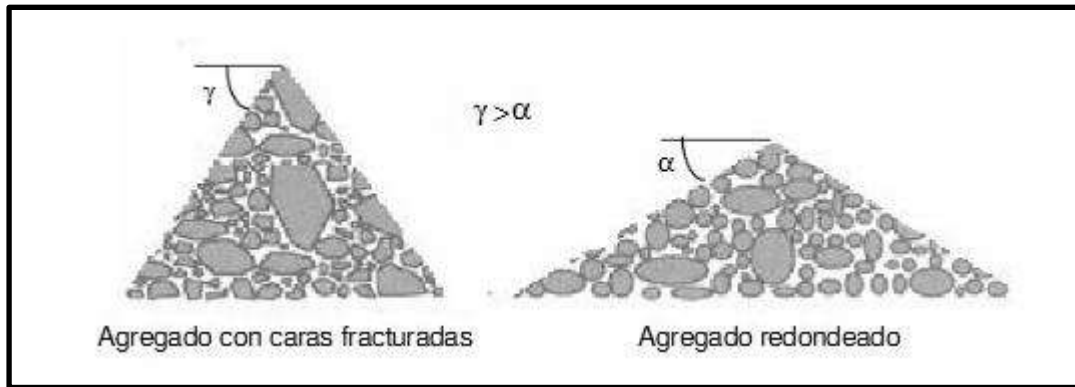


Figura 5. Comportamiento de los Agregados en Pilas de Acopio.

De acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de: cuán unidas estén las partículas del agregado (el término usual es cohesión), la tensión normal a que están sometidos los agregados y la fricción interna de los agregados. Una masa de agregados tiene relativamente baja cohesión. Así, la resistencia al corte depende principalmente de la oposición al movimiento que ofrecen los agregados. Además, cuando es cargada, la masa de agregados tiende a ser más fuerte porque la tensión resultante tiende a unir a los agregados más estrechamente entre sí, lo que ocasiona que la resistencia al corte en la masa de agregados aumente. El ángulo de fricción interna indica la capacidad del agregado para entrelazarse y así crear una masa de agregados casi tan fuerte como las partículas individuales.

Para asegurar una mezcla de materiales resistente a emplear en la elaboración de un concreto asfáltico, se deben especificar propiedades del agregado que mejoren la fricción interna de la mezcla de agregados; esto se logra normalmente recurriendo a porcentajes de caras fracturadas en el material grueso que integra la mezcla. [3]

PROBLEMÁTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Hablando de problemas en la mezcla asfáltica sabemos que es susceptible a diversas degradaciones visibles en la superficie del pavimento. Entre las principales degradaciones se encuentran la deformación permanente (roderas), la fisuración por fatiga y la fisuración térmica. Estas degradaciones generan una reducción de la vida útil del pavimento así como problemas a nivel de la seguridad y del confort. La disminución de la vida útil tiene repercusiones importantes en los costos de mantenimiento, ya que la frecuencia y severidad de las degradaciones aumenta. [4]

AGRIETAMIENTO POR BAJA TEMPERATURA

Este tipo de deterioro se caracteriza por la aparición de fisuras transversales que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme. La fisuración perpendicular al eje del camino, por lo general no se asocia a las cargas del tránsito. Cuando la carpeta se encuentra sobre una losa de concreto asfáltico, el fenómeno puede atribuirse a la reflexión de las grietas que existen en la losa.

La carpeta se contrae debido a las bajas temperaturas, originando esfuerzos de tensión dentro de la capa; en algún lugar a lo largo de la carpeta se excede la resistencia a la tracción y la capa asfáltica se fisura. El ligante asfáltico juega un papel importante en la fisuración por baja temperatura. Las mezclas asfálticas elaboradas con un cemento asfáltico de naturaleza dura o propensa a la oxidación, serán más susceptibles a presentar este tipo de deterioro.

Se ha visto que el empleo de ligantes blandos y resistentes al envejecimiento, reducen notablemente la fisuración por baja temperatura; también es importante lograr mezclas asfálticas impermeables con un contenido de vacíos de aire adecuado, con el propósito de que el cemento asfáltico que constituye la mezcla no resulte excesivamente oxidado.

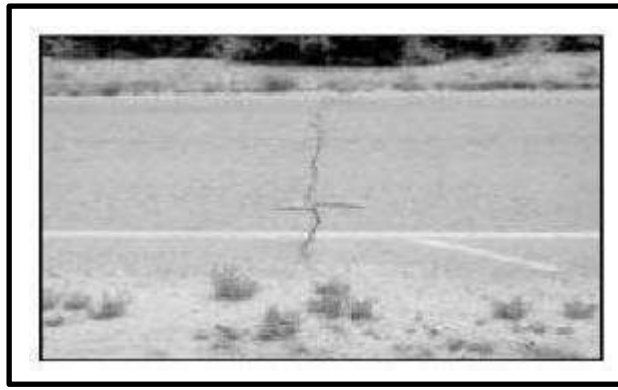


Figura 6. Agrietamiento por Baja Temperatura.

AGRIETAMIENTO POR FATIGA

La fisuración por fatiga es un deterioro que con frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. En el momento de la aplicación de la carga, se producen tensiones de tracción horizontales cerca del fondo de la carpeta asfáltica; el material en esa zona debe ser lo suficientemente resistente para soportar estas tensiones, ya que es ahí donde se presentan las mayores concentraciones e inicia la fisuración en caso de sobrepasarse la resistencia a la tracción de la carpeta. La aparición de fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de la fisuración por fatiga (Figura 7, Izquierda); en algún momento estas fisuras iniciales se unirán con otras (figura 7, Centro), causando un estado intermedio de la fisuración por fatiga dando lugar a lo que se conoce como “piel de cocodrilo”.

Un estado de severidad más avanzado de la fatiga, resulta con la dislocación y desprendimiento de bloques de carpeta asfáltica, bajo la acción del tránsito, con llevando a la formación de baches en la superficie de rodamiento (Figura 7, Derecha). Una mezcla asfáltica muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga cuando la estructura del pavimento permite deflectar a la carpeta asfáltica. Materiales muy rígidos, altas deflexiones y altos niveles de tensiones conducen a vidas útiles, reducidas por la fatiga.

El mecanismo de fatiga no puede enfocarse como un problema de los materiales exclusivamente, ya que este mecanismo se produce generalmente por un número de factores que deben generarse simultáneamente; obviamente un factor trascendental son las cargas pesadas repetidas en el pavimento.

La estructura del pavimento juega un rol central en este tipo de deterioro, ya que una subrasante con un drenaje pobre, resulta en pavimentos blandos con altas deflexiones, pobres diseños y/o deficiente construcción de las capas del pavimento; así como espesores de pavimento muy delgados y rígidos, son también propensos a sufrir altas deflexiones.

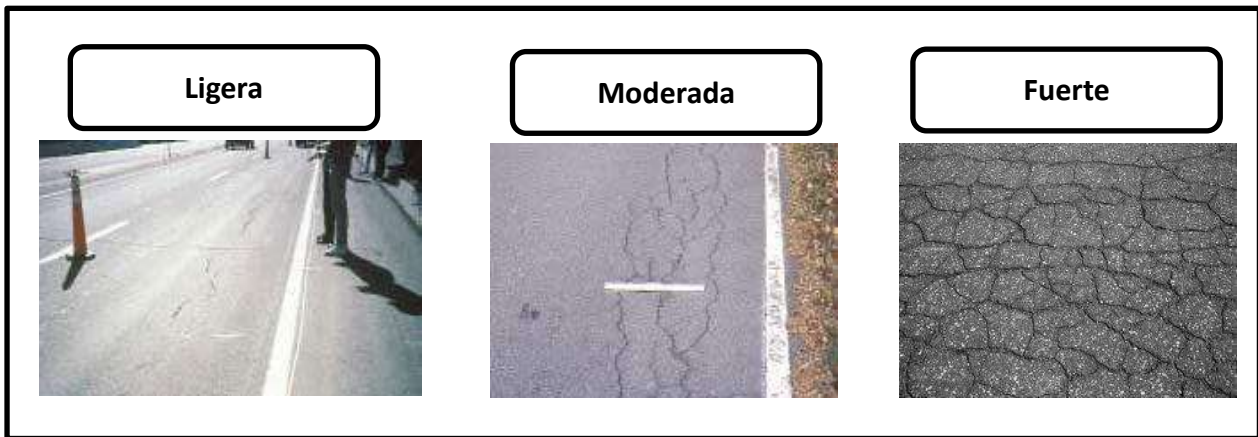


Figura 7. Progreso de la Fisuración por Fatiga.

En otros casos, la fisuración por fatiga es sólo un signo de que un pavimento ha alcanzado el número de cargas para el cual fue diseñado; esto no sería necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño del pavimento. A continuación se enuncian algunas medidas a tomar para evitar la fisuración por fatiga:

- Estimación adecuada del número de ejes equivalentes en la etapa de diseño.
- Mantener por todos los medios posibles seca la subrasante.
- Pavimentos con espesores adecuados de tal forma que no permitan grandes deflexiones en la estructura.
- Utilizar materiales que no sean excesivamente débiles ante la presencia de humedad.
- Emplear materiales en el pavimento lo suficientemente resilientes para resistir deflexiones normales.

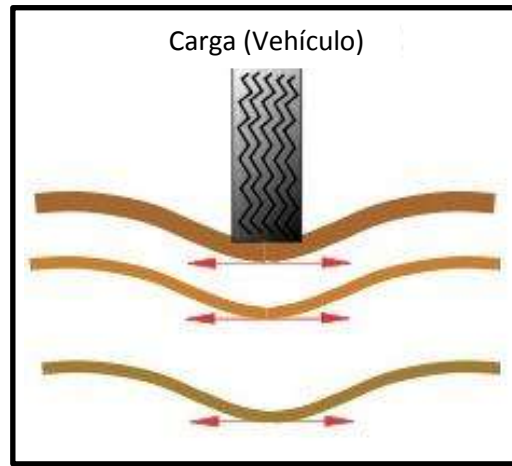


Figura 8. Tensiones en la parte inferior de la carpeta asfáltica

Desde el punto de vista de la fisuración por fatiga, es deseable que la carpeta se comporte como un material elástico blando; para lograr lo anterior y dado que el comportamiento a la tracción de la mezcla asfáltica está fuertemente influido por el ligante asfáltico, se deben seleccionar cementos asfálticos cuyos límites superiores se ubiquen en la parte elástica en lo que se refiere a sus propiedades de rigidez.

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

RODERAS

Las roderas son deformaciones plásticas en la superficie de rodamiento de un pavimento asfáltico, que se presentan a lo largo de la zona de mayor incidencia de los neumáticos de vehículos pesados. Usualmente aparece como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral del material asfáltico.



Figura 9. Formación de roderas en la superficie de rodamiento.
José Eduardo García Servín.

La aparición de roderas en la superficie de rodamiento, aparte de afectar la funcionalidad del pavimento representa un problema serio para quienes transitan por la vía, ya que la acumulación de agua dentro de estas depresiones longitudinales suele causar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos. Es por esto que se deben establecer límites permisibles de profundidad de rodera en función de las consideraciones de seguridad. La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) clasifica las roderas en cuatro grados de severidad:

- 1 Hidroplaneo (0.5 a 0.7 cm)
- 2 Baja (0.7 a 1.25 cm)
- 3 Media (1.25 a 2.5 cm)
- 4 Alta (mayor a 2.5 cm)

Sin embargo, para muchos investigadores el único estándar razonable es aquel que se asocia al hidroplaneo. Pavimentos con pendientes transversales del orden del 2 % y profundidades de rodera de aproximadamente 1.25 cm, son condiciones que se consideran suficientes para causar el hidroplaneo de un automóvil que viaje a una velocidad de 80 km/h o más. A medida que incrementa la profundidad de la rodera, resulta difícil mantener la dirección del vehículo a altas velocidades, lo que se convierte en un gran problema de seguridad para el usuario.

TIPOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE

La deformación permanente en pavimentos flexibles equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irre recuperable. La aparición de roderas en un pavimento flexible se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes y/o deformación permanente en la carpeta asfáltica.

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN CAPAS SUBYACENTES

La deformación se produce por la aplicación repetida de carga en la subrasante, la sub-base o la base por debajo de la carpeta asfáltica (Figura 10) y aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación, el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales.

Frecuentemente es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada y sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando las cargas se aplican. Podría ser también producto de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad.

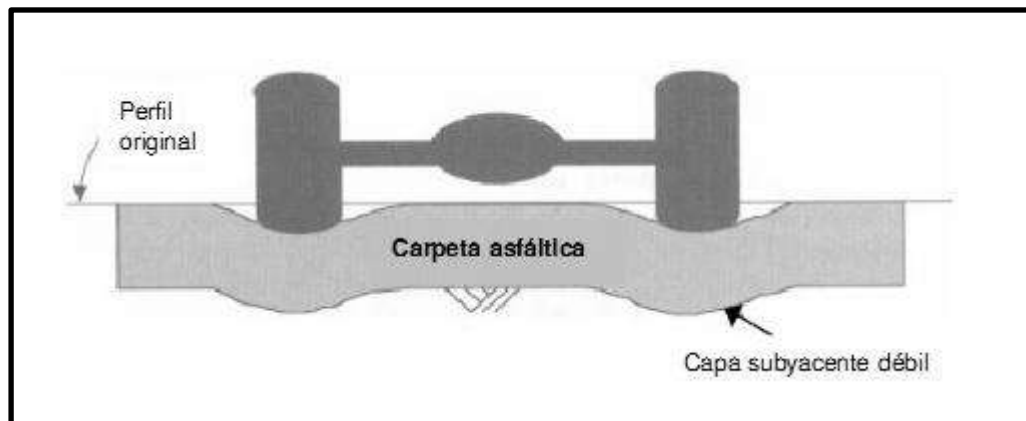


Figura 10. Deformación permanente debido a una capa subyacente débil.

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Cuando una mezcla asfáltica presenta roderas, es evidente que su resistencia al corte es demasiado baja para resistir las cargas pesadas repetidas a las que está sujeta (Figura 11). La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Las superficies de rodamiento que presentan este tipo de problema representan un peligro para el usuario, ya que los surcos que se forman retienen suficiente agua como para provocar hidroplaneo o acumulación de hielo.

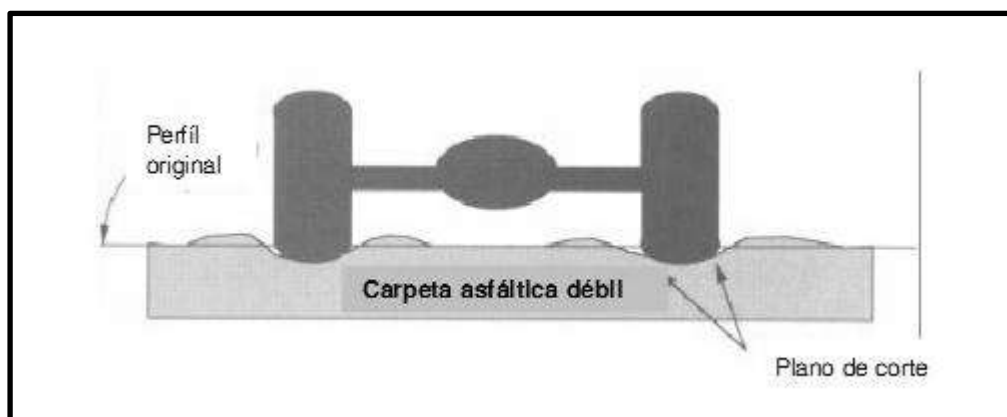


Figura 11. Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil. [3]

VISCOELASTICIDAD

TIPO DE COMPORTAMIENTO

La teoría clásica de la elasticidad considera las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos de acuerdo con la ley de Hooke, es decir, la deformación conseguida es directamente proporcional al esfuerzo aplicado.

De esta forma si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma (Figura 12.a) hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial. Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso (Figura 12.c) éste se deforma, pero no recupera nada de lo que se deforma. Un comportamiento intermedio es el comportamiento viscoelástico (Figura 12.b), en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada.

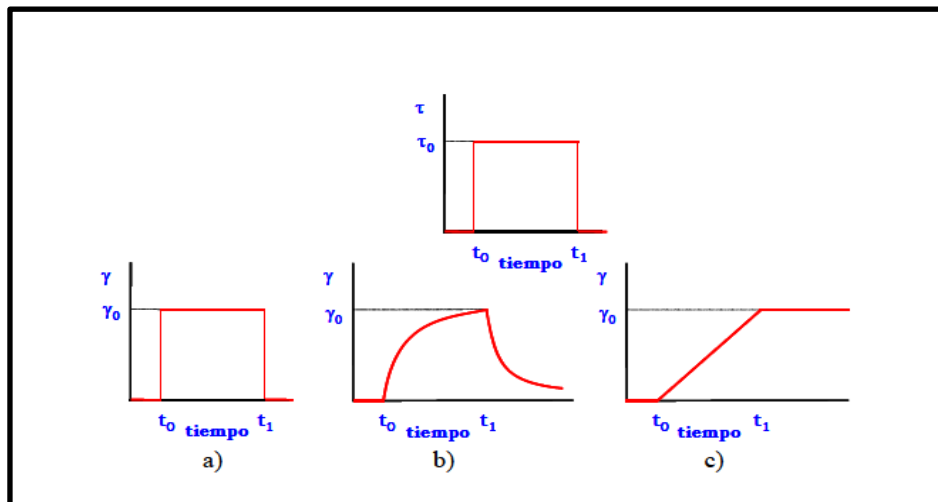


Figura 12. Comportamiento a) Elástico b) Viscoelástico c) Viscoso. [5]

En laboratorio considerando la amplitud de la deformación $|\epsilon|$ y el número de ciclos de carga aplicados (N) se pueden identificar cuatro tipos de comportamientos principales en las mezclas asfálticas.

- Para cargas que comprenden algunos cientos de ciclos y deformaciones (pequeñas) ($<10^{-4}$) el comportamiento es considerado como viscoelástico lineal.
- Durante cargas de decenas de miles de ciclos y deformaciones (pequeñas) se desarrolla un tipo de daño, conocido como el fenómeno de Fatiga.
- Para un número pequeño de cargas y deformaciones importantes, el comportamiento que se observa es fuertemente no lineal.
- Cuando ciclos de esfuerzos (compresión o tensión) son aplicados a partir de un esfuerzo nulo, deformaciones irreversibles no despreciables se producen para amplitudes de deformación cercanas a la ruptura. Su acumulación crea una Deformación Permanente.

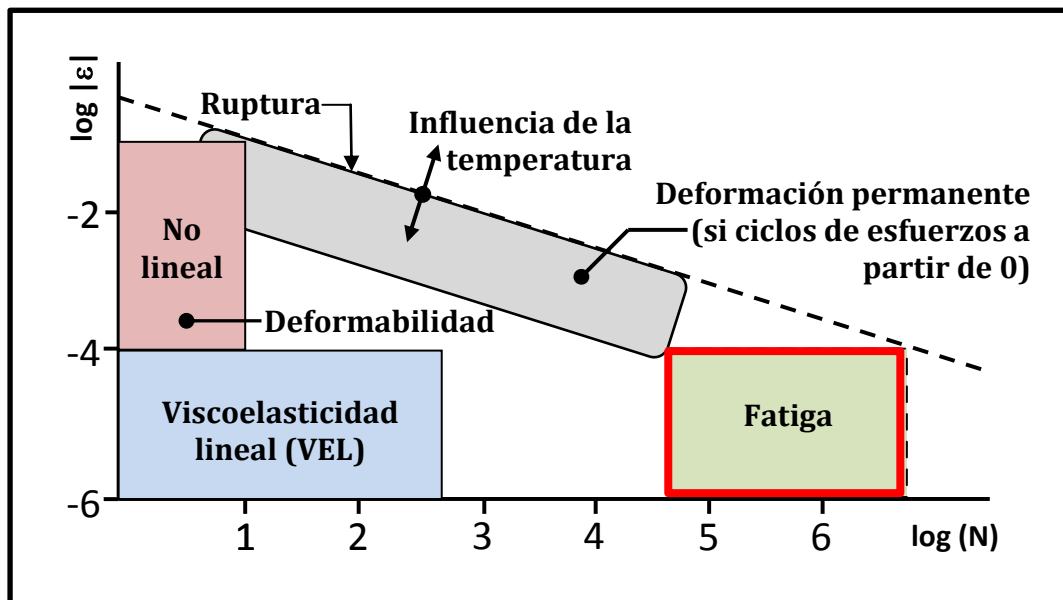


Figura 13. Comportamiento tipo de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, (ϵ) deformación – (N) Número de repeticiones de carga. [6]

En la imagen anterior se pueden observar los diferentes comportamientos de una mezcla asfáltica, éste trabajo solo se enfocará en la parte de Fatiga.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC

ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC

El Protocolo AMAAC se desarrolló en el año 2008 por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C., al ver la necesidad de contar en nuestro país con un método que contemple las condiciones prevalecientes para el territorio nacional. No es necesario realizar mucha investigación para determinar que los pavimentos en México tienen muchos problemas, basta con realizar observaciones por vías de circulación cotidiana para darnos cuenta que la mayoría de las carreteras estatales, federales, autopistas, calles, etc., tienen una gran cantidad de deficiencias que se ven reflejados en los costos de operación.

El Ing. Oscar de Buen Richkarday se reúne con el equipo de la AMAAC, y le sugiere generar una alternativa para mejorar la calidad en las mezclas asfálticas, AMAAC convoca a formar el Comité Técnico sobre Desempeño de Mezclas Asfálticas, Coordinado por el Dr. Paul Garnica Anguas, donde el objetivo de este comité sería hacer especificaciones para las mezclas asfálticas que incluyan ensayos de desempeño.

El Comité Técnico propone generar un protocolo con especificaciones para las mezclas asfálticas que incluyan ensayos de desempeño, control de calidad y algunas recomendaciones de ensayos adicionales para que pudieran llamarse en las especificaciones de proyectos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, como una opción para dicha instancia. Se reúne para trabajar proactivamente en la propuesta de diseño. Tomando en consideración los adelantos hasta ese momento, visitando diversas autoridades de España, Francia y Estados Unidos, para discutir sobre las metodologías utilizadas para el diseño, control de calidad, ensayos en los materiales y mezclas asfálticas. Los laboratorios de referencia mundial fueron:

- CEDEX (España)
- LCPC (Francia)
- Instituto del Asfalto (E.U.)
- SemMaterials (E.U.)

Como puntos relevantes se pudieron encontrar la normalización estandarizada de los métodos que se usan entre todos los constructores españoles y franceses, alineada a la regulación europea. Lo mismo aplica para Estados Unidos, se pudo observar que los laboratorios líderes tienen homologado el diseño SHRP-SUPERPAVE.

Además se observó una gran importancia en la preparación de las diferentes capas de pavimento y un énfasis en el control de la granulometría y tipo del agregado empleado.

De esto se concluyó que México requiere de laboratorios especializados, bien equipados, certificados, que validen la calidad de las mezclas que se usan en los pavimentos y en la obra terminada. Así como generar ESPECIFICACIONES para regular las características de los materiales y sus combinaciones. Requerimientos acordes a las condiciones reales.

Se observó que en general en Europa como en Estados Unidos, las pruebas de rueda cargada como la Rueda de Hamburgo o el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) se consideran una medida exigente de desempeño para calificar los pavimentos antes de la aplicación del mismo. En Estados Unidos se están haciendo mediciones de rueda cargada y correlaciones con medidas del módulo dinámico.

El Comité Técnico de AMAAC consideró que debía de surgir una propuesta de esta prueba para que la SCT la incluya como prueba en la calificación de la mezcla asfáltica.

Terminados los documentos para la propuesta se realizó la revisión del documento en la que participaron diversas personalidades de carácter gubernamental (Dirección General de Servicios Técnicos, CAPUFE, Instituto Mexicano del Transporte, etc.), sector privado, académico (diversas Universidades) obteniendo así la aprobación de dicho protocolo y recomendaciones (como alternativa de diseño).

Se espera que con la implementación del Protocolo AMAAC se aproveche de manera más razonable el asfalto, pues el 95% de las carreteras del mundo están hechas de este material (Figura 14). Las mezclas asfálticas diseñadas con el Protocolo AMAAC tienen un comportamiento superior a los construidos tradicionalmente que las diseñadas con el método Marshall. En los próximos años, se tendrá en México una inversión en infraestructura carretera de gran importancia, por lo tanto es necesario que se realicen diseños adecuados que aseguren el objetivo de un pavimento; seguro, confortable, duradero y económico que satisfaga las necesidades del usuario.



Figura 14. Aproximadamente el 95 % de las carreteras del mundo están hechas de asfalto.

El Protocolo AMAAC es derivado del método SUPERPAVE desarrollado en Estados Unidos, pero adaptado para las características particulares de nuestro país. Y al igual incorpora criterios de España y Francia.

Para una correcta implementación del protocolo se crearon programas de capacitación y de certificación. En relación a la certificación uno de los puntos críticos fue definir los mecanismos para que los laboratorios siguieran los lineamientos que deben cumplir para contar con un control de calidad en equipos, conocimientos y habilidades del personal para poder evaluar los materiales involucrados en la construcción de la carpeta asfáltica.

Para que los laboratorios en México sean acreditados deberán cumplir con las especificaciones del Protocolo AMAAC cubriendo 3 etapas fundamentales: 1) Selección de los Agregados Pétreos, 2) Selección del Cemento Asfáltico y 3) Diseño de la Mezcla Asfáltica. La certificación está conformada por dos tipos; Certificación del Personal y Certificación de los Laboratorios. [7]

PROTOCOLO AMAAC

CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función del nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere.

En la tabla 1 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de la mezcla asfáltica en función del tránsito vehicular. Es importante revisar las columnas 2 y 3 de la tabla 1, para ajustar el criterio. El criterio que resulte más exigente de estas dos columnas será el nivel para el cual se evaluará la mezcla.

Tabla 1. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales tipo D • Carreteras alimentadoras • Carreteras estatales y municipales • Calles urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1,000,000 a 10,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras estatales • Carreteras federales tipo B y C • Vialidades urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	De 10,000,000 a 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales tipo A • Autopistas de cuota 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	Más de 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> • Carreteras federales troncales • Autopistas de cuota importantes • Vialidades suburbana en ciudades muy grandes 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico • Fatiga

La Figura 15, ilustra los diferentes niveles de evaluación para que la mezcla asfáltica cumpla con el nivel de desempeño deseado:



Figura 15. Criterios de selección de ensayos para la evaluación del diseño para mezclas asfálticas.

PROTOCOLO AMAAC NIVEL I

DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

La filosofía del protocolo es que el diseño de la mezcla asfáltica se realice de la manera más adecuada. Teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica está compuesta de agregados pétreos + asfalto, no se puede tener un buen desempeño de la mezcla si primero no se verifica que los materiales cumplen con la calidad requerida.

a) Selección del agregado mineral.- Este debe cumplir como ya se mencionó anteriormente con ciertas especificaciones, para esto es necesario realizar diversas pruebas a nuestro material seleccionado para verificar que se encuentra en condiciones de ser utilizado en nuestra mezcla asfáltica, así como, para poder determinar sus características particulares.

Granulometría de la mezcla. La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla asfáltica cuya designación es la que muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.

Granulometría por tipo de mezcla		
Designación de la mezcla, mm	Tamaño Nominal, mm	Tamaño Máximo, mm
37.5	37.5	50.0
25.0	25.0	37.5
19.0	19.0	25.0
12.5	12.5	19.0
9.5	9.5	12.5

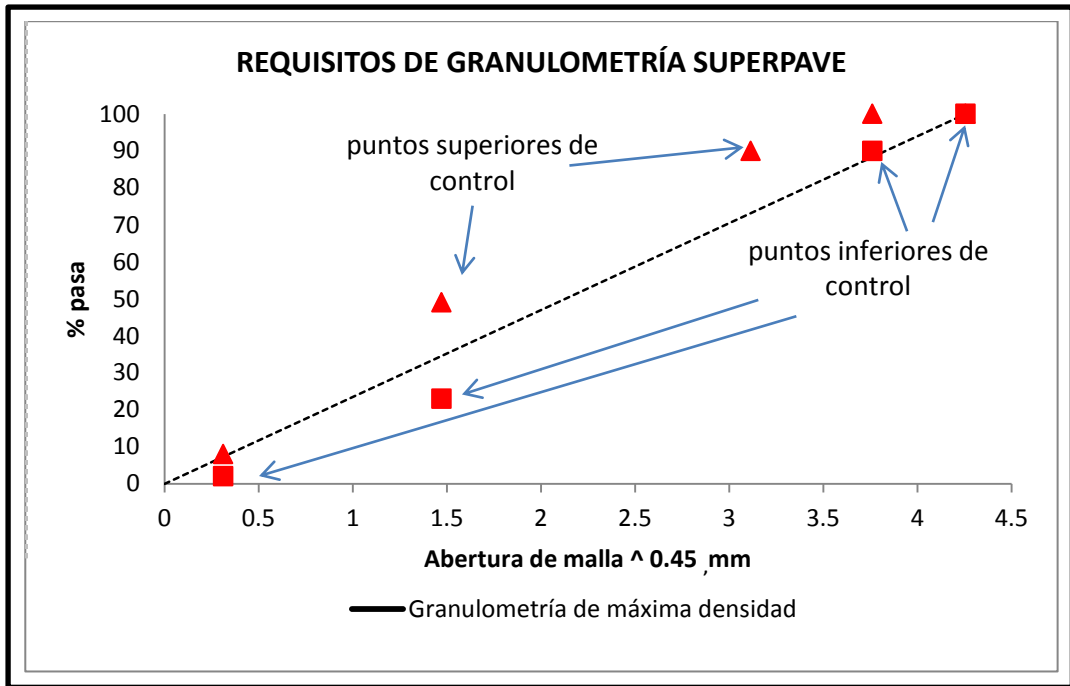
Los requisitos recomendados de granulometría para el caso de una carpeta asfáltica de granulometría densa son los que muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla del Material Pétreo de granulometría Densa.

Tamaño Nominal del Material Pétreo, mm. (pulgadas)						
Designación	Abertura mm	37.5	25	19	12.5	9.5
		1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"
2"	50	100-100	-	-	-	-
1 ½"	37.5	90-100	100-100	-	-	-
1"	25	90	90-100	100-100	-	-
¾"	19	-	90	90-100	100-100	-
½"	12.5	-	-	90	90-100	100-100
3/8"	9.5	-	-	-	90	100-100
4	4.75	-	-	-	-	90
8	2.36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
16	1.18	-	-	-	-	-
30	0.60	-	-	-	-	-
50	0.30	-	-	-	-	-
100	0.15	-	-	-	-	-
200	0.075	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

A manera de ejemplo, la Gráfica 1, ilustra los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19 mm. La escala de la abertura de la malla esta elevada a la potencia 0,45. En todos los demás casos se debe construir la gráfica correspondiente. La línea de máxima densidad de los agregados pétreos va desde el origen (0,0) hasta el tamaño máximo de la distribución granulométrica que se desee representar.

Gráfica 1. Granulometría para mezclas con tamaño nominal 19 mm. (3/4 ").



Recomendaciones generales para la selección del tipo de granulometría requerida por el proyecto.

Tabla 4. Definición de Mezclas de Graduación Densa, Gruesa y Fina.

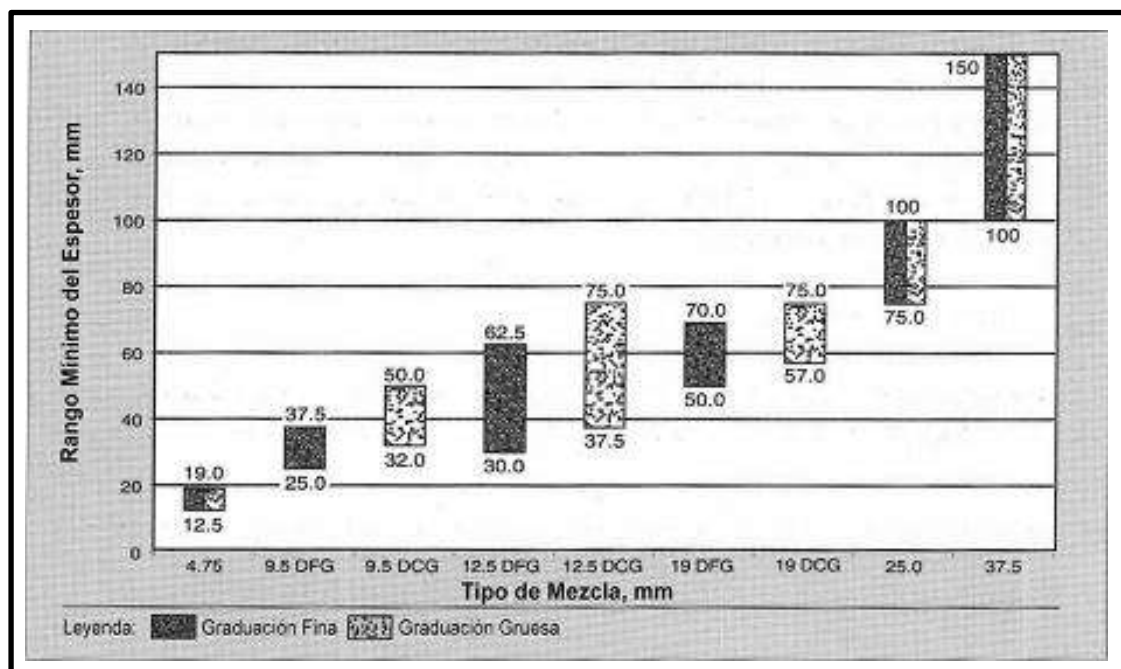
Tamaño de la mezcla	Granulometría Fina	Granulometría Gruesa
37.5 mm (1 ½ ")	>47 % Pasando la malla de 9.5	< 47 % Pasando la malla de 9.5
25.0 mm (1")	>40 % Pasando la malla de 4.75	<40 % Pasando la malla de 4.75
19.0 mm (3/4 ")	>47 % Pasando la malla de 4.75	<47 % Pasando la malla de 4.75
12.5 mm (1/2 ")	>39 % Pasando la malla de 2.36	<39 % Pasando la malla de 2.36
9.5 mm (3/8 ")	>47 % Pasando la malla de 2.36	<47 % Pasando la malla de 2.36
4.75 mm (Malla número 4)	N/A (granulometría no estándar)	

Tabla 5. Ventajas de las Mezclas de Granulometría Densa, Gruesa y Fina.

Granulometría Gruesa	Granulometría Fina
Menor permeabilidad	Permite espesores gruesos («25 mm TN)
Trabajabilidad (<25 mm TN)	Incrementa la macrotextura(«25 mm TN)
Espesores delgados («25 mm TN)	Mejor estructura interna (friccionante)
Mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio	Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto
Textura lisa («25 mm TN)	

Durante el proceso de diseño se debe verificar que el espesor de la capa asfáltica donde se va a colocar la mezcla se encuentre dentro del rango establecido en la Gráfica 2. En caso de no cumplir con lo estipulado en dicha tabla, se debe cambiar el tamaño máximo de la mezcla.

Grafica 2. Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de graduación densa (DFG - Mezcla densa de granulometría fina, DCG - Mezcla densa de granulometría gruesa).



Una mezcla de granulometría densa se puede utilizar para cumplir cualquiera o todas las necesidades de los diseñadores de pavimento siguientes:

- Estructural (Mezclas finas y gruesas de 37,5, 25 y 19 mm). Este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.
- Fricción (Mezclas gruesas de 19, 12,5 y 9,5 mm). Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.
- Nivelación (Mezclas finas de 12,5 y 9,5 mm). Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.
- Bacheo (Mezclas finas y gruesas de 12,5 y 9,5 mm). La mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.

Las mezclas con función estructural de granulometría fina se recomiendan para caminos de tránsito bajo y/o moderado donde no se colocará ningún tipo de tratamiento superficial o capa de desgaste. Para caminos de tránsito de moderado a alto, donde será colocado algún tipo de tratamiento superficial, se recomienda el uso de mezclas con función estructural usando granulometrías gruesas. Sin embargo, se debe evaluar ambos tipos de mezclas densas para colocar la que tenga mejores propiedades volumétricas y de desempeño óptimo en las pruebas de simulación que se describen más adelante (sección de la susceptibilidad a la deformación permanente y en la sección de Fatiga).

Para la selección adecuada del tipo de mezcla y los espesores mínimos y máximos, se recomienda consultar la serie informativa 1285 “Guía para seleccionar el tipo de Mezcla Asfáltica en caliente (HMA) para pavimentos” disponible en las publicaciones traducidas por AMAAC de la NAPA (National Asphalt Pavement Association).

CALIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo seleccionado son las que se indican en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (Capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (Capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado	AASHTO T 104	15 máx. Para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2008	90 mín.

Tabla 7. Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (Capas estructurales) 55 min. (Capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (Capas estructurales) 12 máx. (Capas de rodadura)

Se recomienda considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de material.

Además de los criterios antes señalados se deben realizar todas las pruebas a los agregados minerales que se citan a continuación, estas son por recomendación de la AMAAC.

- Reducción de muestras (ASTM C702-98(03)).
- Análisis granulométrico (ASTM C136-06).
- Densidad y absorción de agregados gruesos (ASTM C127-07).
- Densidad y absorción de agregados finos (ASTM C128-07a)
- Determinación del valor equivalente de arena (ASTM D2419-09).
- Determinación de partículas planas y alargadas (ASTM D4791-05).
- Azul de metileno (Filler) (RA 05/10).
- Determinación del % de partículas fracturadas en agregados gruesos (ASTM D5821-01).
- Intemperismo acelerado (ASTM C88-05).
- Desgaste de los ángeles (ASTM C131-06).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Ebullición (ASTM D 3625-96).
- Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en mezclas asfálticas por acción del agua. (RA 07/2010).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (MMP 4.04.009/03).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (RA 08/08).
- Angularidad del agregado fino (AASHTO T304-08).
- Desgaste Microdeval (AASHTO T327-09).

b) Material Asfáltico.- El cemento asfáltico se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se espera en el lugar de aplicación. Si el cemento asfáltico seleccionado es convencional, se le determinará su carta de viscosidad usando un Viscosímetro Rotacional de acuerdo a la norma ASTM D-4402. De esta carta se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación (en el laboratorio) adecuadas que corresponderán a los valores de viscosidad que se presentan en la Tabla 8. Para cementos asfálticos modificados las temperaturas mencionadas deben ser proporcionadas por el proveedor.

Tabla 8. Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.

Característica	Rango de Viscosidad, (Pa.seg.)
Temperatura de mezclado	0.15 a 0.19
Temperatura de compactación	0.25 a 0.31



Figura. 16. Imagen del Viscosímetro Rotacional: José Eduardo García Servín.

c) Mezcla Asfáltica.- En esta sección se presentan los requerimientos que debe cumplir una mezcla asfáltica que se indica en la tabla 9. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla entre 3 y 5%, cumpliéndose además los requerimientos indicados en la tabla 10.

La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio de acuerdo con la recomendación AMAAC- RA-06/2011.

Tabla 9. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica.

Requerimientos Para el Diseño Volumétrico de la Mezcla										
Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima (Gmm))			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño Nominal (mm)						
	N_{ini}	N_{dis}	$N_{máx}$	37.5	25	19	12.5	9.5		
I Bajo	$\leq 91,5$	96	≤ 98	11	12	13	14	15	70-80	0.6-1.2
II Medio	$\leq 90,5$								65-78	
III Alto	$\leq 90,5$								65-78	
IV Muy Alto	≤ 89								65-75	

Tabla 10. Esfuerzo requerido para la compactación giratoria según el tránsito esperado en el carril de diseño.

Millones de ejes equivalentes.	Parámetros de Compactación		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{máx}
< 1	6	50	75
1 < 10	7	75	115
10 < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear las fórmulas mostradas a continuación:

Gravedad Específica Bruta.- Se determina midiendo la masa seca y el volumen bruto de una muestra de agregados (ASTM E-127 o ASTM C-128). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. El volumen bruto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (1)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica neta (total).

P₁, P₂, P_n = Porcentajes individuales por masa de agregado.

G₁, G₂, G_n = Gravedad específica neta individual del agregado.

% de Absorción del Material (finos y gruesos).- Podemos definir la absorción, como la cantidad de agua absorbida por el agregado sumergido en el agua durante 24 horas.

$$Abs_{indiv} = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2)}{100} \quad (2)$$

Donde:

Abs_{individual} = Agua absorbida para cada material analizado.

P₁ = % retenido en la malla 4 (4.75 mm.).

A₁ = Agua absorbida en el material retenido en la malla 4 (4.75 mm.).

P₂ = % que pasa la malla 4 (4.75 mm.).

A₂ = Agua absorbida en el material que pasa la malla 4 (4.75 mm.).

% de Vacíos de Aire.- Es la concentración en volumen del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

V_a = % de vacíos de aire en la mezcla.

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla compactada.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

Vacíos en el Agregado Mineral.- Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Usualmente, no se considera como parte del VAM, el volumen de asfalto absorbido. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo y el volumen de aire necesarios en la mezcla. Valores mínimos de VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuya a la durabilidad de la mezcla.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (4)$$

Donde:

VAM = Vacíos en el agregado mineral.

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla.

P_s = Porcentaje de agregado en el espécimen.

G_{sb} = Gravedad específica total del agregado.

Vacíos Llenos con Asfalto.- Es el porcentaje de VAM que contienen asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}) no sea demasiado pequeño como para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como obtener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel de tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas es la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA son demasiados altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas.

$$VFA = 100 \times \frac{(VAM - V_a)}{VAM} \quad (5)$$

Donde:

VFA = % de volumen de VAM lleno de asfalto.

VAM = % de vacíos en el agregado mineral.

V_a = % de vacíos de aire del volumen total de la mezcla.

Gravedad Específica Efectiva.- Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua pero no con asfalto. La gravedad específica del agregado no se mide directamente, a diferencia de las gravedades específicas bruta y aparente. Esta se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el contenido de asfalto (P_b). Solo las gravedades específicas bruta y efectiva son utilizadas para el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Los volúmenes calculados para cada uno tendrán diferentes significados, y por ende, diferentes valores numéricos.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100 - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (6)$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

P_b = % de asfalto.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Contenido de Asfalto Absorbido.- Es la concentración de masa del cemento asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado.

$$P_{ba} = 100 \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) \times G_b \quad (7)$$

Donde:

P_{ba} = % de asfalto absorbido.

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} = Gravedad específica total del agregado.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Contenido de Asfalto Efectivo.- Es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje.

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} \times P_s \right) \quad (8)$$

Donde:

P_{be} = % de asfalto efectivo.

P_b = % de asfalto.

P_{ba} = % de asfalto absorbido.

P_s = % de agregado.

Relación Filler/ Asfalto.- Es la relación que existe entre el filler con respecto al porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}).

$$\text{Relación Filler/ Asfalto} = \frac{\% \text{ Pasa la malla \# 200}}{P_{be}} \quad (9)$$

SEGUIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CONTENIDO ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTÍCAS HASTA EL NIVEL II

Se realiza la revisión de la calidad de los materiales pétreos, después de seleccionada la distribución granulométrica ideal para el proyecto, preestablecido el grado de desempeño que se utiliza en la mezcla y revisada la relación de adherencia pétreo-asfalto, se procede a calcular el contenido óptimo para la granulometría propuesta.

SUSCEPTIBILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD

El ensaye se debe realizar aplicando la Recomendación AMAAC RA-04/2010 "Resistencia de las mezclas asfálticas al daño inducido por humedad" y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable de TSR es = 80%.

El objetivo principal de la prueba es determinar la resistencia al daño inducido por humedad, también conocida como resistencia retenida, de una mezcla asfáltica compactada. La resistencia retenida es importante para establecer si una mezcla asfáltica es susceptible a la acción de la humedad, tal como se solicita en la norma de la SCT-N-CMT-4-05-003, calidad de las mezclas asfálticas para carreteras.

La preparación de la muestra consiste en especímenes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diámetro por 63.5 ± 2.5 mm de altura o de 150 mm de diámetro por 95 ± 5 mm de altura. Se deben preparar al menos seis especímenes para el ensaye, la mitad para ser ensayados en seco y el resto para ser ensayados después de un acondicionamiento que consiste en la saturación parcial del espécimen acompañado de un ciclo de congelación y deshielo.

De los especímenes se determina el peso saturado y superficialmente seco y se registra como B' . El volumen de agua absorbida (J') en centímetros cúbicos se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$J' = B' - A \quad (10)$$

Donde:

J' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos.

B' = Es el peso saturado y superficialmente seco después de la saturación parcial, g.

A = Es el peso del espécimen seco en aire, g.

Se determina el grado de saturación (S') comparando el volumen de agua absorbida (J') con el volumen de vacíos (V_a), con base en la siguiente ecuación:

$$S' = \frac{100 J'}{V_a} \quad (11)$$

Donde:

S' = Es el volumen de agua absorbida, centímetros cúbicos.

Si el grado de saturación está entre el 70 y 80% se pasa al siguiente punto. Si el grado de saturación es menor al 70%, se requiere someter el espécimen nuevamente al proceso de saturación. Si el grado de saturación es mayor del 80%, el espécimen ha sido dañado y debe ser descartado.

El ensaye de los especímenes consiste en la determinación del esfuerzo máximo, que es capaz de soportar la mezcla compactada, bajo el ensaye de tensión indirecta a una temperatura de 25 ° C, para los especímenes acondicionados y no acondicionados.

Se registra la carga máxima aplicada (o tensión indirecta). El ensaye debe continuar hasta que se aprecia una grieta vertical. Se retira el espécimen de la prensa y se jalan las dos mitades para provocar su separación. Visualmente se determina si el agregado grueso se rompió o solo se separó del asfalto.

Se calcula la resistencia a la tensión indirecta, con la expresión que se indica a continuación:

$$S_t = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad (12)$$

Donde:

S_t = Es la resistencia a la tensión indirecta, KPa.

P= Es la carga máxima, N.

t= Es el espesor o altura del espécimen, mm.

D= Es el diámetro del espécimen, mm.

Se reporta la resistencia de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad como el cociente de la resistencia a tensión indirecta promedio de los especímenes acondicionados entre la resistencia de los especímenes no acondicionados, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

TSR= Es la resistencia al daño inducido por humedad, expresada en %.

S_1 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes no acondicionados, KPa.

S_2 = Es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes acondicionados, KPa.



Figura 17. Ensayo de Tensión Indirecta.

PROTOCOLO AMAAC NIVEL II

SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para realizar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se podrán emplear los ensayos siguientes:

ESPECIFICACIONES CON RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-01/2011, Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del analizador de la rueda de carga de Hamburgo (HWT).

Las especificaciones se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Número mínimo de pasadas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.

Nivel de tránsito	Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm.
bajo	10,000
medio	15,000
alto/ muy alto	20,000



Figura 18. Rueda Cargada de Hamburgo.

ESPECIFICACIONES CON EL APA

El ensaye debe realizarse de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-02/2011. Susceptibilidad a la deformación por rodera de una mezcla asfáltica, por medio del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

En la Tabla 12 se indican las especificaciones correspondientes en relación con el nivel de tránsito vehicular.

Tabla 12. Especificaciones de rodera máxima con el Analizador de Pavimentos Asfálticos. APA para 8,000 ciclos.

Nivel de tránsito	Rodera máxima
Bajo	7.0 mm
Medio	5.5 mm
Alto	4.0 mm
Muy alto	3.0 mm



Figura 19. Analizador de Pavimentos Asfálticos.

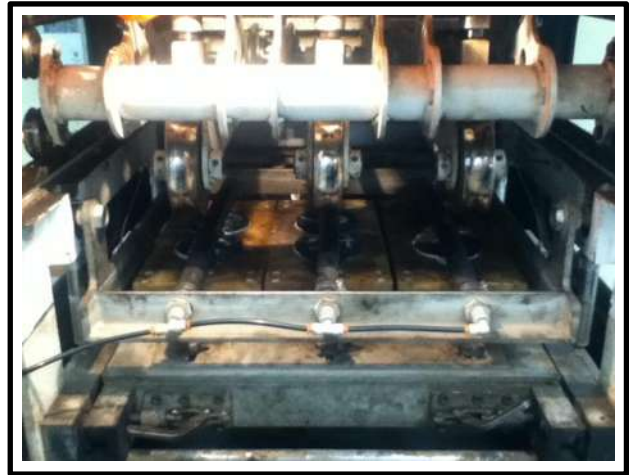


Figura 20. Vista interior del APA.

José Eduardo García Servín.

ESPECIFICACIONES CON EL ENSAYE DE PISTA ESPAÑOLA

El ensaye se debe realizar de acuerdo a la recomendación AMAAC RA-03/2011, Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista española de ensayo. En la Tabla 13 se indican las especificaciones correspondientes.

Tabla 13. Velocidad máxima de deformación para el diseño de mezclas asfálticas mediante la máquina de pista en mm/min para el intervalo de 105 a 120 minutos.

	Nivel de tránsito			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Velocidad máxima de deformación en mm/min	0.2	0.2	0.15	0.12

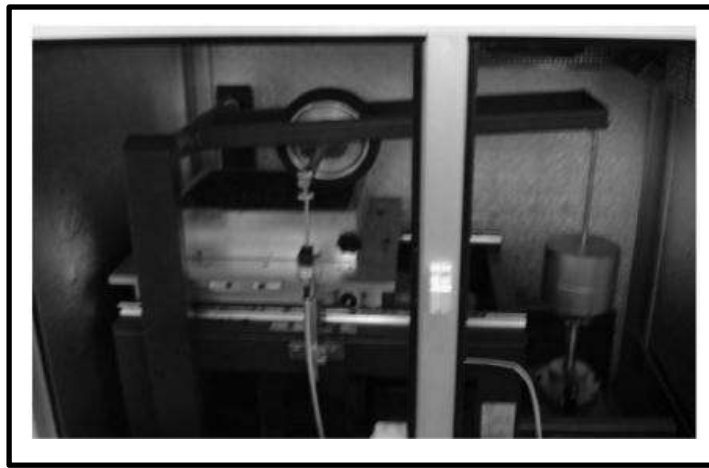


Figura 21. Imagen de la Pista Española.

PROTOCOLO AMAAC NIVEL III

MÓDULO DINÁMICO

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Se recomienda determinarlo con el procedimiento AASHTO TP62-07, debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay especificaciones de aceptación o rechazo en el parámetro de diseño.

Para el caso del protocolo se ha considerado un ensayo en probetas cilíndricas con un diámetro $\phi = 4"$, y con una altura h igual a 15 cms. En modo de compresión axial no confinada, evaluada a 5 diferentes temperaturas (-10, -5, 20.9, 37.4, 53.9 °C) y evaluada a 6 diferentes frecuencias (0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz.).



Figura 22. Imagen de la cámara GCTS para Módulo Dinámico.
José Eduardo García Servín.

PROTOCOLO AMAAC NIVEL IV

FATIGA

En el nivel 4 de diseño se recomienda que una vez determinada la fórmula de trabajo, se deba determinar la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, empleando la viga de flexión de 4 puntos, conforme al procedimiento especificado en el método ASTM D7460-08 bajo las siguientes condiciones:

- Ciclos de falla = 2000 micro deformaciones ($\mu\epsilon$)
- Frecuencia = 10 Hz.
- Volumen de vacíos de las probetas = 4 +- 1.0 %
- Temperatura de prueba = 20°C
- Método de prueba = AASHTO T-321

Dependiendo del nivel de tránsito, las especificaciones correspondientes se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa. [8]

Nivel de tránsito	Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras
Bajo	2000
Medio, Alto y Muy alto	5000

Las especificaciones presentadas en el protocolo no describen de forma adecuada los requerimientos para la determinación de la ley de fatiga en mezclas asfálticas. Uno de los objetivos de este trabajo es definir dichos requerimientos.



Figura 23. Imagen del Equipo GCTS, Exterior (Izquierda) e Interior (Derecha) para el Ensayo de Fatiga Empleando la Viga de Flexión de 4 Puntos. José Eduardo García Servín.

CAPÍTULO 3

FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

INTRODUCCIÓN A LA FATIGA

El fenómeno de fatiga de un material se caracteriza por su ruptura después de la aplicación repetida de un gran número de sollicitaciones (en la práctica $N > 10^4$), en donde la amplitud de la sollicitación es inferior a la carga de ruptura instantánea de la probeta. [9]

Los primeros estudios fundamentales del fenómeno de fatiga en laboratorio fueron realizados en los metales por Wöhler en 1852. Son estos los materiales para los cuales se tienen mayor conocimiento. Sin embargo, en los últimos años se han realizado diversos estudios en materiales carreteros, concretos y materiales compuestos.

En el caso de las mezclas asfálticas, éstas son sometidas a sollicitaciones de corta duración al paso de los ejes de los vehículos. La fisuración por fatiga no se presenta inmediatamente, esta se presenta con el tiempo debido a la repetición de cargas en la base de la carretera a causa de esfuerzos de tracción que se acumulan a cada paso de los neumáticos.

HISTORIA

Un componente se ve sometido a fatiga cuando soporta cargas alternadas: la rueda de un ferrocarril, la biela de un motor de explosión, entre otros. Pese a diseñarse estas piezas por debajo de su límite elástico, con un número suficiente de ciclos, las piezas se rompen. El 90% de las piezas que se rompen en servicio fallan debido a esta insidiosa patología. Esto lo descubre August Wöhler, hacia el año 1860, y propone unos límites a las tensiones de diseño en función del número de ciclos que se requieran para una pieza. [10]

CURVAS DE WÖHLER

August Wöhler introdujo las curvas S-N (Tensión-Número de ciclos) que llevan su nombre para describir la relación entre la amplitud de las tensiones cíclicas y el número de ciclos para su ruptura.

Las tensiones cíclicas aplicadas pueden ser de naturaleza axial, flexional o torsional. Sin embargo es importante tener claro la amplitud y frecuencia de las tensiones

aplicadas de tal forma que podamos hablar de tensiones simétricas, asimétricas o de carácter aleatorio.

Las propiedades de la fatiga de los materiales pueden ser determinados a partir de ensayos de simulación en laboratorio; dichos ensayos deben en lo posible reproducir con exactitud las condiciones de servicio del material. Tradicionalmente se somete el material a tensiones cíclicas máximas relativamente altas y se registra el número de ciclos hasta su ruptura, posteriormente se reduce la amplitud de las tensiones máximas y se repite el experimento. Es importante mencionar que el número de ciclos va asociado directamente a la vida del material, es decir se puede garantizar un determinado tiempo de vida útil de una estructura si las tensiones se mantienen en un valor determinado. Es en este tipo de situación donde nos valemos del análisis estadístico para dar buenas previsiones. [11]

August Wöhler (el 22 de junio de 1819 - el 21 de marzo de 1914) era un ingeniero alemán, mejor recordado por sus investigaciones sistemáticas de la fatiga metálica. Nacido en la ciudad de Soltau, fue hijo del profesor local Georg Heinrich Wöhler, mostró su capacidad matemática desde muy temprano y ganó una beca para estudiar en Technische Hochschule en Hannover, bajo la dirección de Karl Karmarsch.

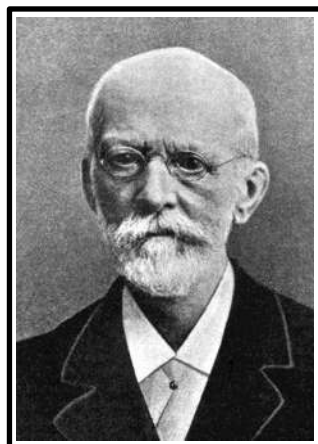


Figura 24. Fotografía de August Wöhler

En 1840, se reclutó en Berlín donde trabajó en la fabricación de pistas ferroviarias. En 1843, después de una breve permanencia en Hannover, comenzó a recibir la instrucción en la conducción de locomotoras en Bélgica, volviendo como un ingeniero a Hannover. Hacia 1847, Wöhler era el superintendente principal del material rodante en el Ferrocarril de la Silesia-Brandenberg Inferior. Su reputación creciente lo llevó en 1852 a ser ministro del comercio para investigar las causas de la fractura en el eje del ferrocarril, trabajo que debía ocupar Wöhler durante las próximas dos décadas.

El ferrocarril se nacionalizó en 1854 y el reconocimiento de su administración entusiasta y el mando técnico causó su cita como el director de los Ferrocarriles Imperiales recién formados (Bahn alemán), basado en la oficina central del consejo en Estrasburgo, que sostuvo hasta su retiro en 1889.

Wöhler comenzó sus investigaciones del eje, por la investigación en la teoría de elasticidad y se condujo, en 1855, a un método para predecir la desviación de la viga de la celosía.

Su trabajo de fatiga, señales de la primera investigación sistemática de Curvas de S-N, también conocido como curvas de Wöhler, para caracterizar el comportamiento de la fatiga de materiales. Tales curvas pueden ser usadas para reducir al mínimo el problema de la fatiga bajando la tensión a puntos críticos en un componente.

Wöhler mostró claramente que la fatiga ocurre por el crecimiento primero de defectos superficiales hasta que el producto ya no pueda apoyar la carga aplicada. La historia de una fractura se puede entender de un estudio de la superficie de la fractura. Desarrolló el aparato para la carga repetida de ejes de ferrocarril, principalmente porque muchos accidentes fueron causados por la fractura de la fatiga repentina. La presentación de su trabajo en la Exposición Parisiense en 1867 lo trajo a un amplio auditorio internacional. Wöhler era un ingeniero que abogaba por la estandarización estatal, probando y realizando la certificación de hierro y acero. Murió en Hannover en 1914. [12]

Aparece una microgrieta, que crece a medida que se realizan ciclos de carga hasta alcanzar un tamaño tal que la sección remanente es incapaz de soportar la carga máxima en el ciclo y finalmente el ligamento restante rompe de forma frágil o dúctil. A las formas de crecimiento lento de la grieta se les llama subcríticas, como lo es la fatiga.

Por cientos de años, la fatiga de material, no fue una preocupación para los entendidos en la materia. Debido en gran parte, a lo lento del desarrollo productivo e industrial. Con lo cual, las cargas a utilizar, eran bastante menores. Pero con el arribo de la Revolución Industrial, aquel paradigma, fue derrumbándose rápidamente.

Los primeros casos de fatiga de material, que llamaron la atención, fueron las ruedas de las locomotoras. Claro, ya que al aumentar el proceso productivo, de las industrias, su carga era mucho mayor, a lo que acostumbraban transportar.

TEORÍAS SOBRE LA FATIGA

Para explicar el fenómeno se propusieron teorías que justificaban la pérdida de resistencia mecánica en la alteración de la estructura interna del acero por campos magnéticos o por el propio giro del eje.

Por absurdas que puedan parecer estas teorías, hay que tener en cuenta que por entonces los conocimientos relativos a la estructura interna de los materiales eran muy limitados, aunque se sabía que el proceso de fabricación condicionaba la textura del material confiriéndole unas determinadas propiedades.

No es extraño entonces que se razonara que la ruptura inesperada se produjera por la transformación de la estructura fibrosa del acero en una estructura cristalina», sin que los mismos que defendían estas teorías supieran muy bien a qué se referían.

Hacia 1845, Rankine demostró que la reducción de las concentraciones de tensiones alargaba la vida del eje. Posteriormente, hacia 1860, Wöhler desarrolló diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno, una de las cuales, la probeta rotatoria, inspira los actuales ensayos de fatiga de materiales férricos.

Wöhler extrajo dos conclusiones de aquellos ensayos: la primera, que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas son muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían (límite de fatiga).

Ya en el siglo XX, Humfrey y Ewing observaron que, bajo cargas dinámicas, aparecían deformaciones por deslizamiento similares a las obtenidas en el caso estático, de modo que el progreso de dichas líneas era el que conducía a la rotura. Posteriormente, Hanson y Gough introdujeron la hipótesis del endurecimiento por deformación (acritud) para explicar la existencia del límite de fatiga, de modo que con cargas pequeñas el endurecimiento llegaba a compensar y detener el avance del deslizamiento.

Actualmente, aunque se acepta la teoría del endurecimiento/deslizamiento, no existe una formulación cuantitativa que permita realizar un cálculo fiable. No obstante, la multitud de datos disponibles, especialmente para materiales férricos y otros materiales metálicos, ha permitido desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables. Este no es el caso de materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos. [10]

MECANISMOS DE FALLA

Durante el ensayo de fatiga, independientemente de la sollicitación impuesta (sollicitación sinusoidal de fuerza o sollicitación sinusoidales de desplazamiento), se distinguen tres fases de evolución del módulo complejo de rigidez en función del número de ciclo.

Fase 1: También llamada Fase de Adaptación, se observa una caída rápida del valor del módulo. Durante este periodo, se asocian fenómenos como el de calentamiento y la tixotropía. Para el caso de niveles bajos de sollicitación, De la Roche y Bodin [13], concluyen que la disipación viscosa y los acoplamientos termomecánicos no son significativos.

Fase 2: Fase de Fatiga, está definida por una línea ligeramente inclinada que traduce el establecimiento de un régimen estable y cuasilineal, con una lenta evolución del daño causado por la creación de micro-fisuras al interior del material.

Fase 3: Fase de Ruptura, el módulo decrece brutalmente, se presentan zonas de concentración de esfuerzos y un desarrollo rápido de macro-fisuras, de igual forma la aparición de perturbaciones térmicas en los puntos de fisuración [14]. Finalmente la probeta se rompe.

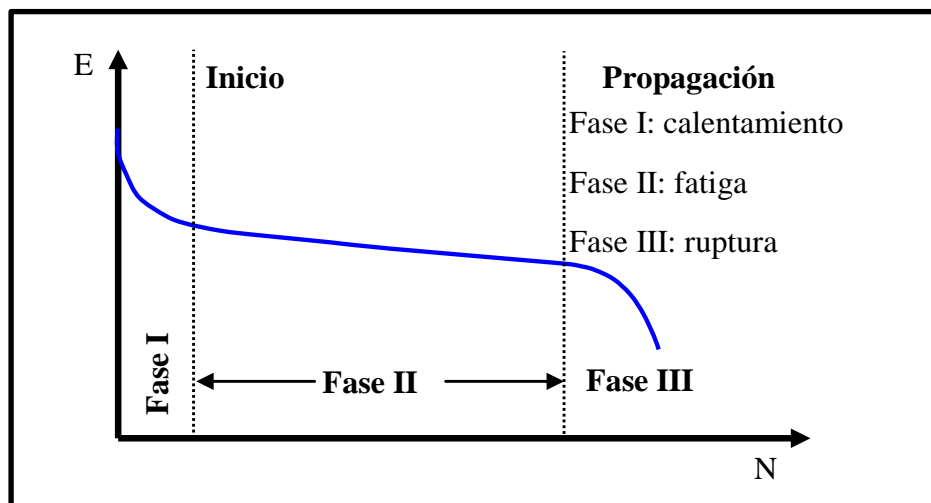


Figura 25. Distinción de las Tres Fases del Ensayo de Fatiga.

ENSAYO DE FATIGA EN EL ACERO

Los primeros ensayos que se realizaron para el estudio de la fatiga surgieron en los aceros, es por este motivo que se tiene un poco de más información en relación a este tema. A continuación se presenta el ensayo de tensión que se le realiza a los aceros para poder determinar su resistencia a la fatiga.

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, específicamente del Acero, se efectúan ensayos para medir su comportamiento en distintas situaciones. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura 26.

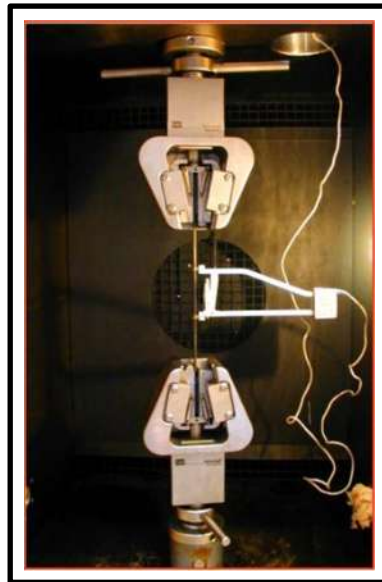


Figura 26. Imagen de la Máquina en el Ensayo de Tracción.

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un plotter que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

Gráfica 3. Gráfica Ensayo de Tracción Desplazamiento vs Fuerza.

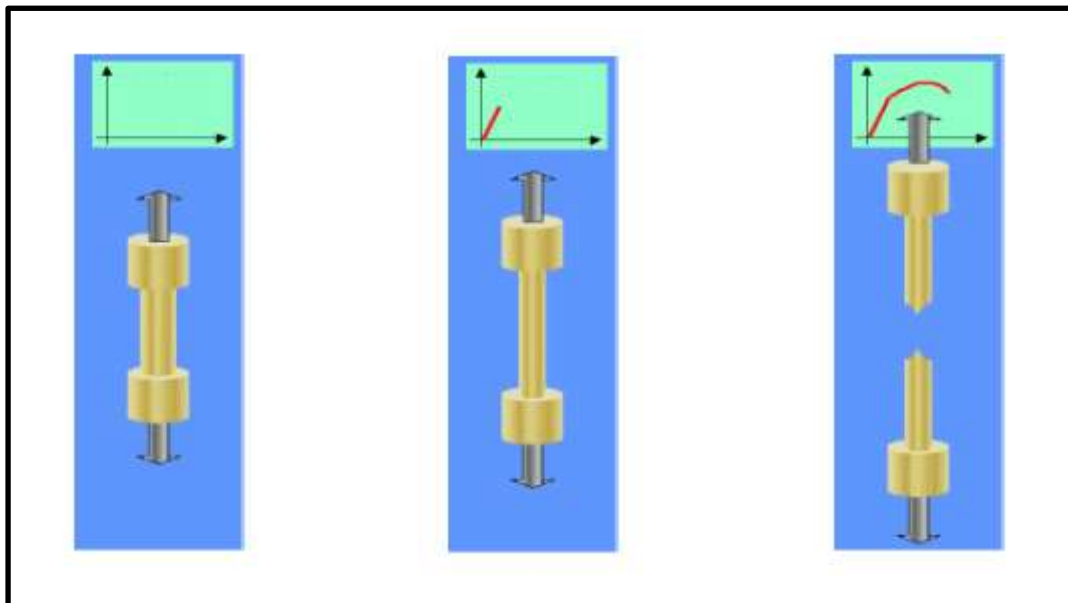
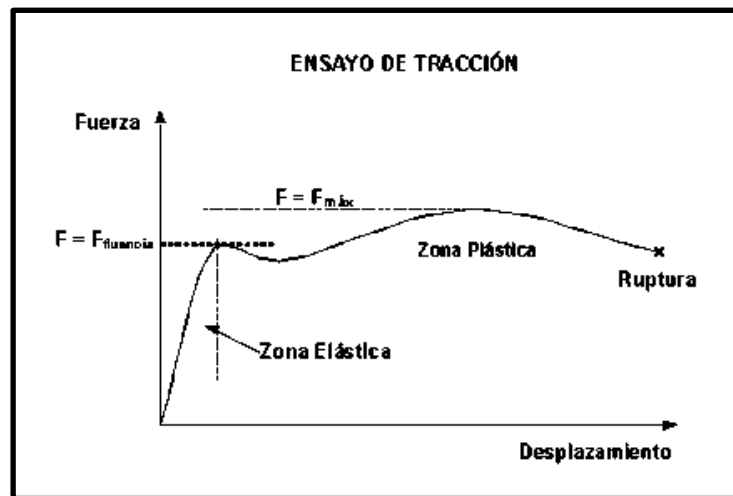


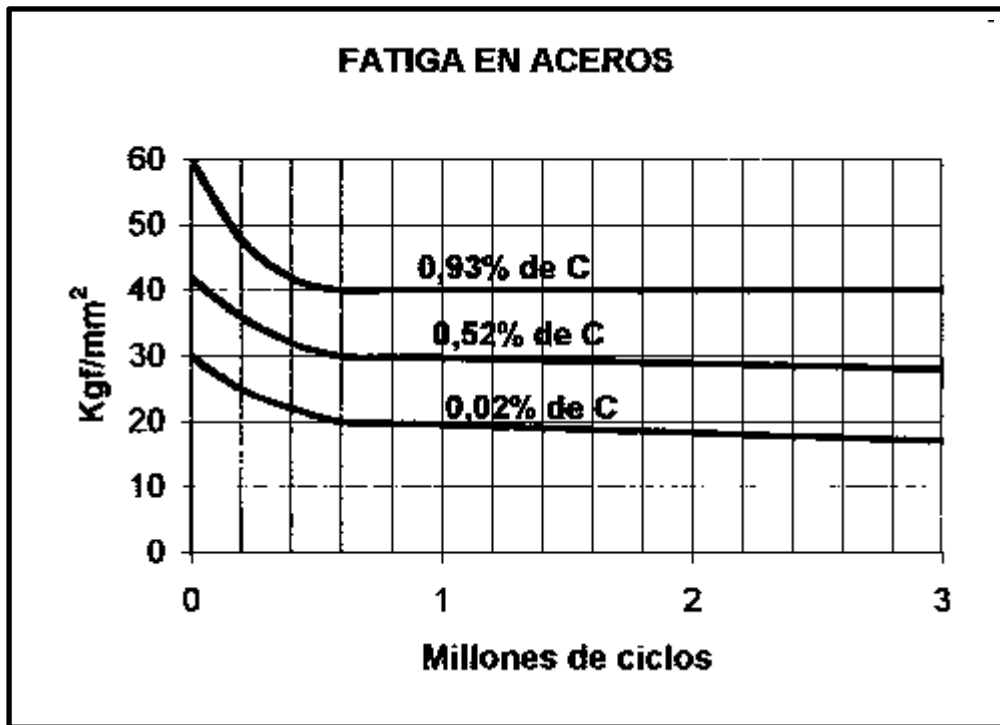
Figura. 27. Modelación del Transcurso del Ensayo de Tracción. [15].

La curva es decreciente hasta el millón de ciclos, luego de los cuales la probeta no se rompe. Esta carga que no logra romper la probeta, es la carga de vida infinita y el esfuerzo que provoca es el llamado límite de resistencia a la fatiga: S_e .

Este valor S_e . Se utilizará para diseñar elementos sometidos a cargas fluctuantes, como es el caso de los ejes en general. [16]

En las pruebas de fatiga en aceros también se someten probetas a esfuerzos cíclicos que varían periódicamente de valores positivos a negativos, según diferentes frecuencias. Tras la prueba, se somete a la probeta a un ensayo de resistencia a tracción hasta rotura. Las curvas resultantes de representar la resistencia de cada probeta en función del número de ciclos sufridos presentan un aspecto similar al de la Gráfica 4. En ella puede observarse como estas curvas tienden asintóticamente a valores de resistencia, denominados tensión de fatiga, que se mantienen para ciclos de hasta 1 o 2 millones de ciclos. La resistencia de estas probetas es inferior a la obtenida sometiendo al acero a cargas aplicadas durante largo tiempo.

Gráfica 4. Curvas de Fatiga en Aceros. [17]



S_e , aun no se ha podido llegar a definir para el caso de los materiales asfálticos.

ENSAYO DE FATIGA EN EL CONCRETO

Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requisitos de diseño de la estructura. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en Estados Unidos o en megapascales (Mpa) en unidades SI. En México se expresan dichos valores en Kilogramos por centímetro cuadrado. (Kg/cm²). [18]



Figura 28. Ensayo de Prueba de Fatiga en el Concreto.

PRUEBA DE LA DETERMINACIÓN A LA FLEXIÓN

Para el caso de los pavimentos de concreto hidráulico el ensayo de flexión en 3 o 4 puntos es el ensayo más utilizado o ensayo base.

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas

(150 x 150 mm) de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) en libras por pulgada cuadrada (Mpa) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

El Módulo de Rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. El Módulo de Rotura determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto en un 15%.

Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, puede ser requerido el diseño de la mezcla en el laboratorio, basado en los ensayos de resistencia a la flexión, o puede ser seleccionado un contenido de material cementante, basado en una experiencia pasada para obtener el Módulo de Rotura de diseño. Se utiliza también el Módulo de Rotura para el control de campo y de aceptación de los pavimentos. Se utiliza muy poco el ensayo a flexión para el concreto estructural. Las Agencias y empresas que no utilizan la resistencia a la flexión para el control de campo, generalmente hallaron conveniente y confiable el uso de la resistencia a compresión para juzgar la calidad del concreto entregado.

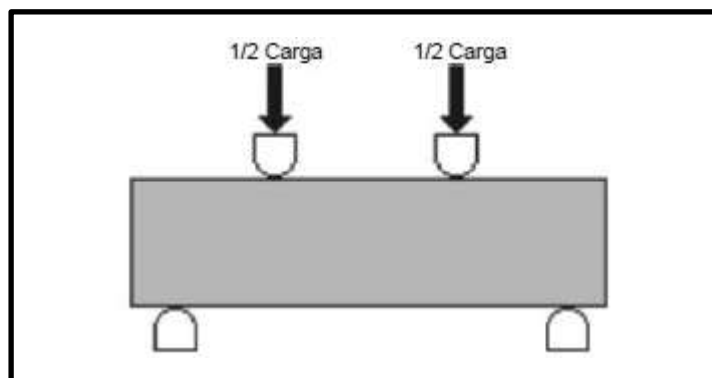


Figura 29. ASTM C78. Cargas en los puntos tercios. La mitad de la carga se aplica en cada tercio de la luz. El módulo de rotura es más bajo que en el caso de la carga en el punto medio. La tensión máxima en el tercio medio de la viga.

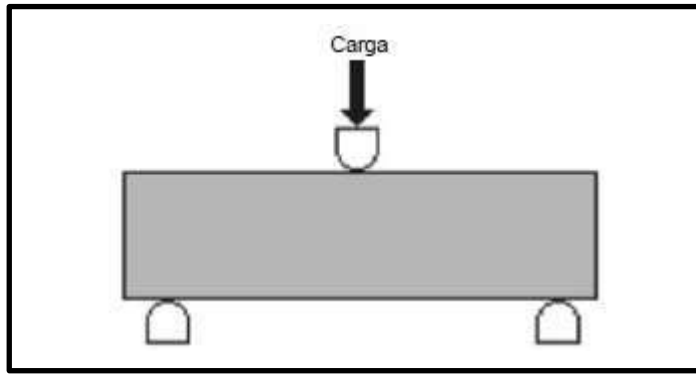
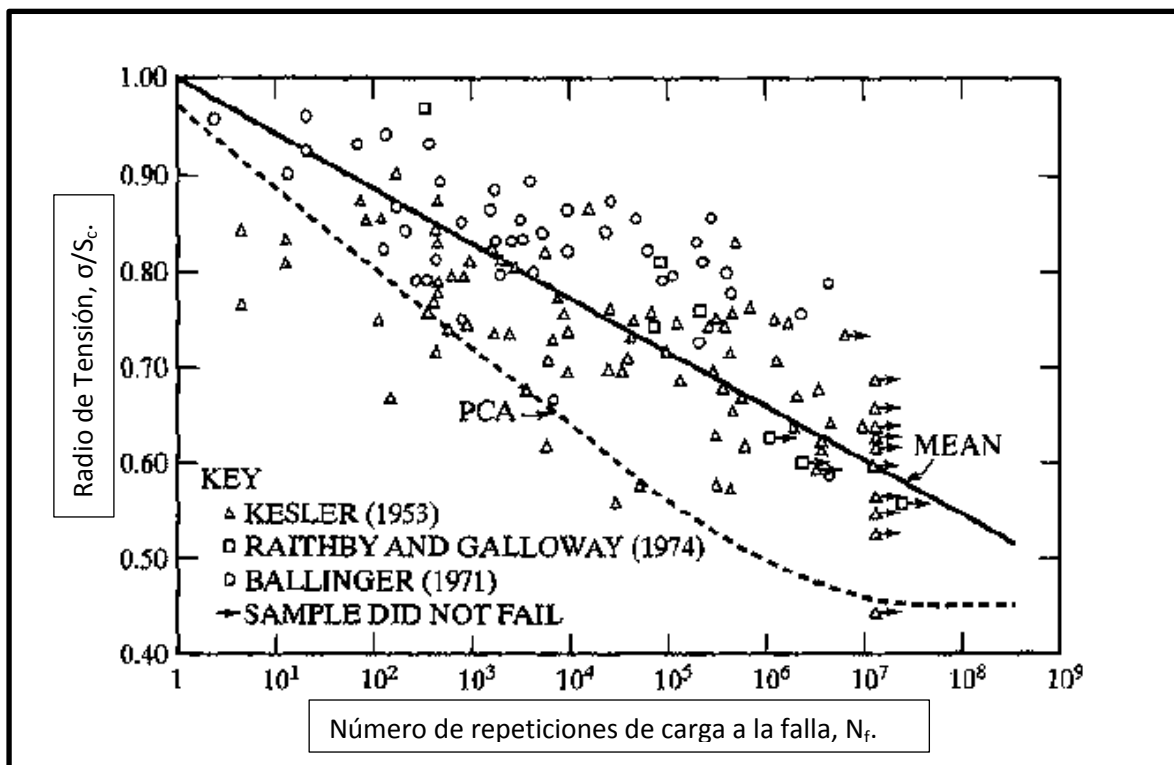


Figura 30. Carga en el punto medio. Toda la carga se aplica en el centro de la luz. El módulo de rotura será mayor que en caso de la carga en los puntos tercios. La tensión máxima solo en el centro de la viga. [19].

En el ensayo de fatiga se requiere utilizar esfuerzos cíclicos, los cuales varían de valores positivos a negativos, además de que se utilizan a diferentes frecuencias. A continuación se presenta el gráfico de fatiga para el concreto, se podrá observar como diferentes autores plasmaron sus diferentes resultados, por lo cual existe una cierta dispersión entre estos puntos según cada autor. La línea recta, es el promedio de todos estos valores que se obtuvieron después de los ensayos de fatiga, para poder regir así el límite a la fatiga del concreto. La línea punteada es la que propone la PCA, la cual se puede apreciar que presenta un valor menor a la fatiga que el que proponen los autores.

Gráfica 5. Resultados del Ensayo de Fatiga según Autores. [20].



CAPÍTULO 4

ENSAYOS DE FATIGA EN LABORATORIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ENSAYO DE FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Este comportamiento de las mezclas asfálticas, busca representar el tipo de esfuerzos al que está sometida la estructura del pavimento, es el que normalmente se reproduce en el laboratorio por métodos estandarizados de larga ejecución, cuando se ensayan diferentes tipos de probetas a flexión a dos, tres y cuatro puntos de apoyo, (Figura 31). En estos ensayos se someten probetas a una serie de cargas cíclicas, en la que se mantiene constante la tensión, la deformación o el desplazamiento aplicado, hasta que se produce el fallo de la mezcla. [21] En el siguiente capítulo se explica detalladamente en que consiste cada una de las pruebas que aquí se mencionan.

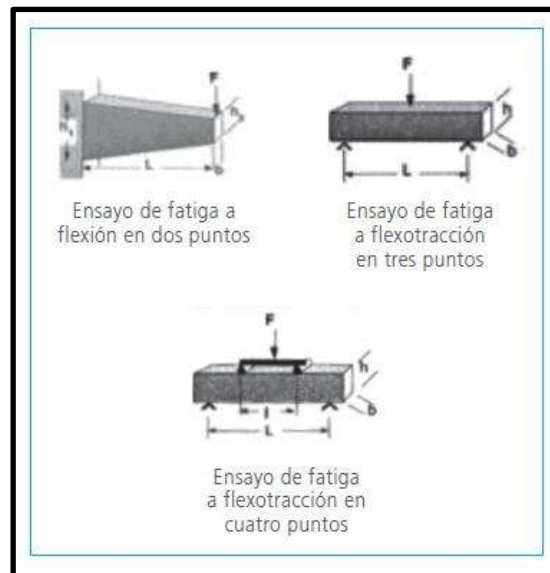


Figura 31. Tipos de probetas sometidos a diferentes tipos de flexión.

CURVA S-N (TENSIÓN-NÚMERO DE CICLOS)

Estas curvas se obtienen a través de una serie de ensayos donde una probeta del material se somete a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente $2/3$ de la resistencia estática a tracción). Se cuentan los ciclos hasta rotura.

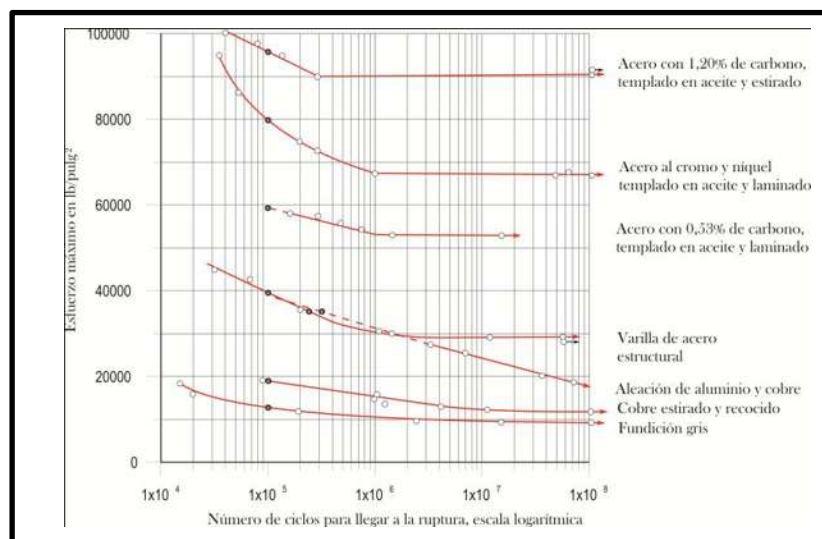
Los resultados se representan en un diagrama de tensión S , frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la rotura para cada una de las probetas. Los valores de S se toman normalmente como amplitudes de esfuerzo (σ_a).

En todo caso, existe una diferencia notable entre la teoría y la realidad. Esto conduce a incertidumbres significativas en el diseño cuando la vida a fatiga o el límite de fatiga son considerados.

La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, tensión media y frecuencia de carga del ensayo.

Aproximadamente la mitad de las probetas ensayadas se rompen a niveles de tensión que están cerca del 25% por debajo de la curva S-N. Esto suele asociarse a la presencia de fuentes de concentración de tensiones internas, tales como defectos, impurezas, ralladuras que han permanecido indetectadas.

Gráfica 6. Gráfica curvas S-N de la Fatiga en los Aceros.



Otro parámetro importante que caracteriza el comportamiento a fatiga de un material es la vida a fatiga N_f . Es el número de ciclos para producir una rotura a un nivel especificado de tensiones.

El comportamiento general de los materiales a fatiga es que, para cualquier nivel de tensiones, siempre encontramos un número de ciclos que nos producen la fractura. No obstante, cuando el número de ciclos es tan grande como 8×10^6 , lo que supera con creces el servicio previsto para una pieza, podemos suponer que su vida es infinita. Este es el concepto que se define como tensión límite de fatiga. [22]

ENSAYOS DE FATIGA EN LABORATORIO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen diferentes tipos de ensayos de laboratorio para la determinación de la vida a la fatiga de la mezcla asfáltica. Estos ensayos se pueden clasificar en dos grandes grupos: ensayos homogéneos y no homogéneos.

En el primer grupo se encuentran el ensayo triaxial, ensayo de tensión-compresión simple en probetas cilíndricas y ciertos ensayos de cizallamiento. Los ensayos no homogéneos son los ensayos de flexión (en 2, 3 o 4 puntos) y el ensayo de compresión diametral.

En el caso de los ensayos homogéneos, el estado de esfuerzos y de deformaciones es el mismo en cada punto de la probeta ensayada. Esto permite que los ensayos homogéneos den acceso a la ley de comportamiento sin la necesidad de utilizar hipótesis complementarias. Los ensayos no homogéneos necesitan de la incorporación de hipótesis y la realización de cálculos más o menos complejos para obtener ese comportamiento.

Experimentalmente se ha observado que la dispersión en los ensayos homogéneos es menor y reduce notablemente el número de evaluaciones necesarias para determinar la curva de fatiga. [23]



Figura 32. Prensa Universal utilizada para ensayos de Compresión en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). José Eduardo García Servín.

MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA (MÉTODO BRASILEÑO)

El ensayo de tensión indirecta reproduce el estado de tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tensión. Es un método práctico y simple para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar las fallas causadas por tensiones de tracción.

Este ensayo consiste en aplicar una sollicitación de compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de tal manera que los esfuerzos aplicados a la probeta se ubiquen sobre dos generatrices opuestas a lo largo de un plano diametral vertical. Esta configuración de carga, desarrolla una tensión de tracción uniforme perpendicular a la dirección de la carga aplicada y a lo largo del plano vertical diametral, que finalmente causa el fallo de la muestra por fractura a lo largo del diámetro vertical.

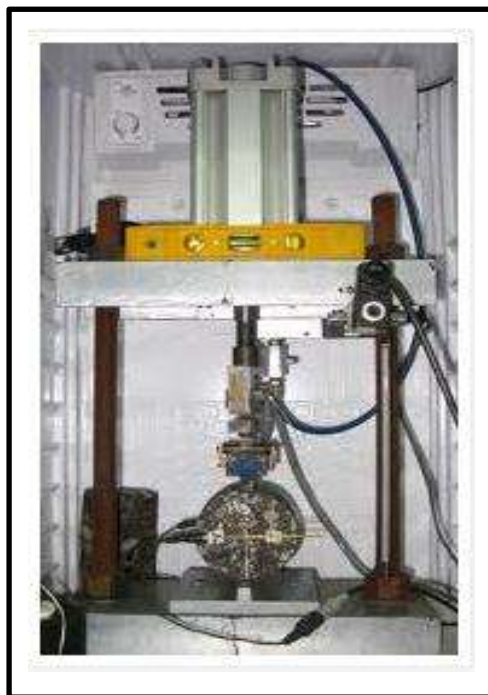


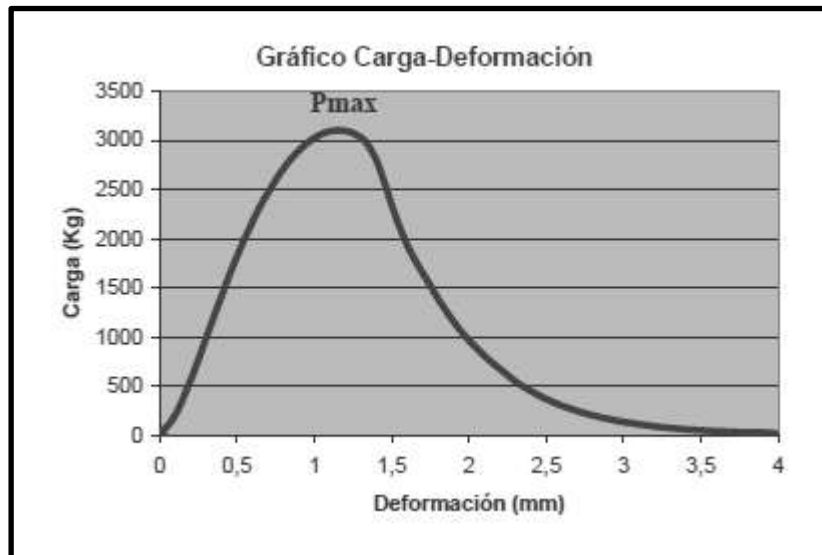
Figura 33. Instrumentación utilizada en el Ensayo de Tensión Indirecta.

El ensayo se realiza bajo impulsos repetidos y se mide el desplazamiento vertical, Gráfica 7, el desplazamiento vertical y horizontal del diámetro de la probeta durante la aplicación de la sollicitación.

En el ensayo dinámico, la probeta se somete a una carga cíclica de compresión, midiéndose la deformación horizontal producida.

El ciclo de carga está compuesto de un pulso de amplitud y duración establecida, junto con el coeficiente de Poisson variable según la temperatura de ensayo, son los necesarios para determinar el módulo resiliente. [24]

Gráfica 7. Gráfico de Carga-Deformación en el Ensayo Brasileño.



Todos los ensayos cíclicos están sometidos a cargas repetidas con sollicitaciones pequeñas que inducen a la fatiga después de ciertos números de ciclos, por lo regular mayores de 10^4 .

MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 2 PUNTOS

La prueba de fatiga es desarrollada en LCPC desde 1965. El estudio de los parámetros de la prueba influyen como modo de temperatura y carga (fuerza o desplazamiento), dichos estudios fueron realizados por Doan (1970). La prueba se utiliza ampliamente en Europa y fue estandarizado en Francia. Sus resultados se utilizan en el método francés para pavimentos.

La muestra se fija de su base trapezoidal grande y se busca su punto máximo. Se busca que se impongan a fuerza o desplazamiento. El interés de una muestra de sección trapezoidal es eliminar los rebajes y el punto de aplicación de la carga. Así, se pueden evitar los efectos mínimos y la concentración de tensión en el borde por debajo del punto de aplicación de carga en la aparición de grietas. La nueva máquina que se ha utilizado en los laboratorios LCPC dispone de cuatro pruebas simultáneas.



Figura 34. Esquema de la muestra de la prueba de tensión de flexión en los 2 puntos.



Figura 35. Aparato de prueba de flexión en 2 puntos (LCPC Nantes-Francia).

MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 3 PUNTOS

El espécimen es una viga que descansa sobre dos apoyos simples (Figura 36). La sollicitación se aplica al centro de la viga impuesta en función de tensión o deformación.

El momento de flexión es cero en el apoyo derecho y varía linealmente hasta alcanzar su valor máximo en el centro de la probeta. El plano de rotura generalmente se encuentra en el mismo punto o muy cerca de ella.

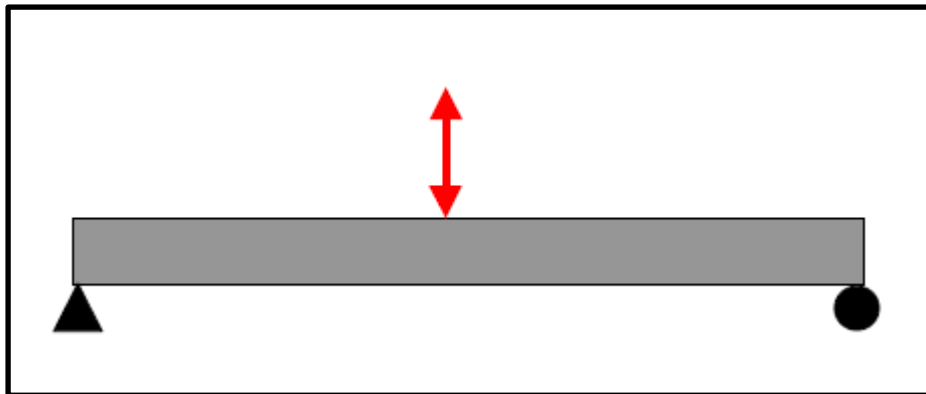


Figura 36. Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión en 3 puntos. [25]

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a una carga cíclica en un ensayo de fatiga por flexión en tres puntos, utilizando probetas prismáticas. El procedimiento consiste básicamente 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, de forma: $D = D_0 \text{ Sen } (2\pi Ft)$, hasta el fallo de la probeta. [26]

MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 4 PUNTOS

Esta prueba se utiliza ampliamente en los Estados Unidos. Fue elegido siguiendo el programa SHRP para el estudio de la fatiga de asfalto. Esta prueba se diseñó para evitar la concentración de daños en el centro de la viga observada en el ensayo de flexión de tres puntos.

La tensión se ejerce en dos puntos simétricos, se parte la muestra en tres secciones como se muestra en la Figura 37. En ausencia de cizallamiento entre estos dos puntos, se puede aprovechar una zona de tiempo uniforme suficientemente larga.

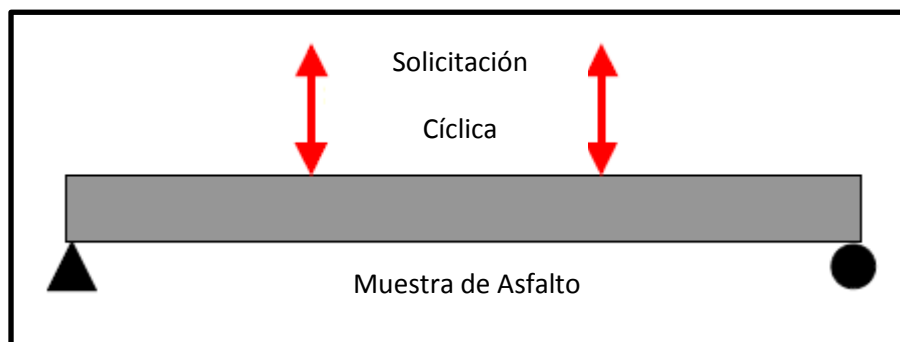


Figura 37. Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión 4 puntos.

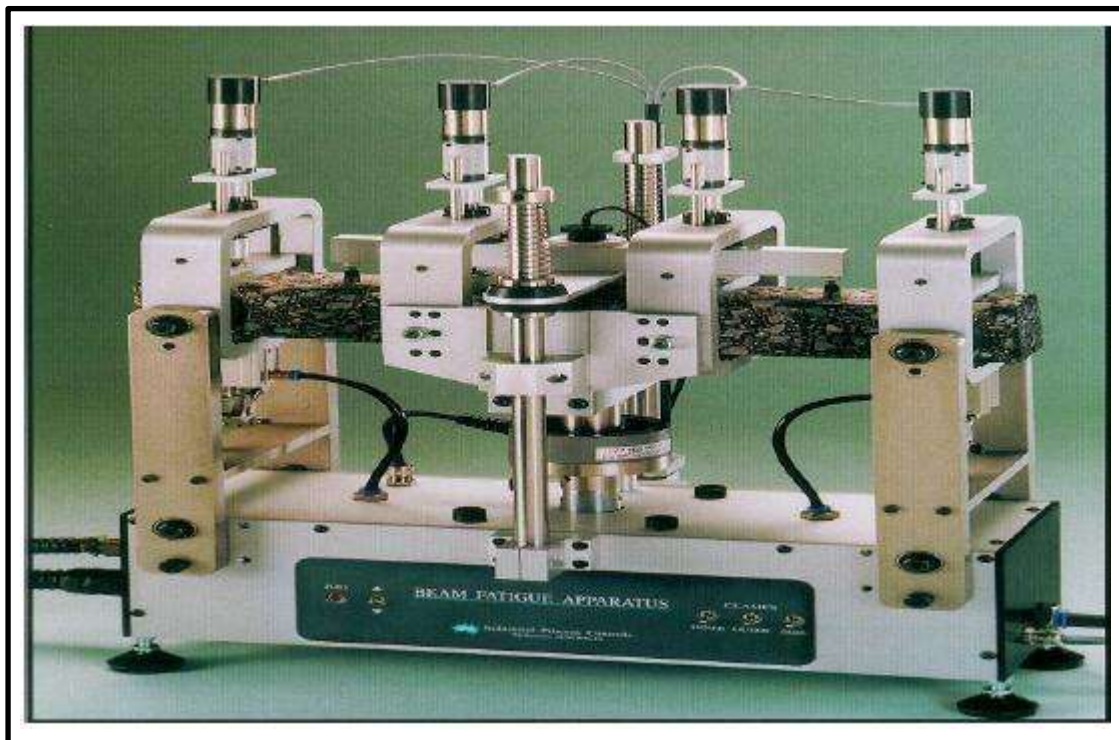


Figura 38. Aparato de la prueba de flexión de cuatro puntos (DWW-Países Bajos).

FLEXIÓN CON APOYO

El ensayo de flexión apoyado lleva a una mejora muy importante con respecto a los ensayos de flexión 3 y 4 puntos. En esta prueba y para una mejor simulación de condiciones de la carretera, la probeta se coloca en una membrana de caucho o una capa de aire a presión (Figura 39). La geometría de la probeta es el de una viga o en una placa rectangular o circular.

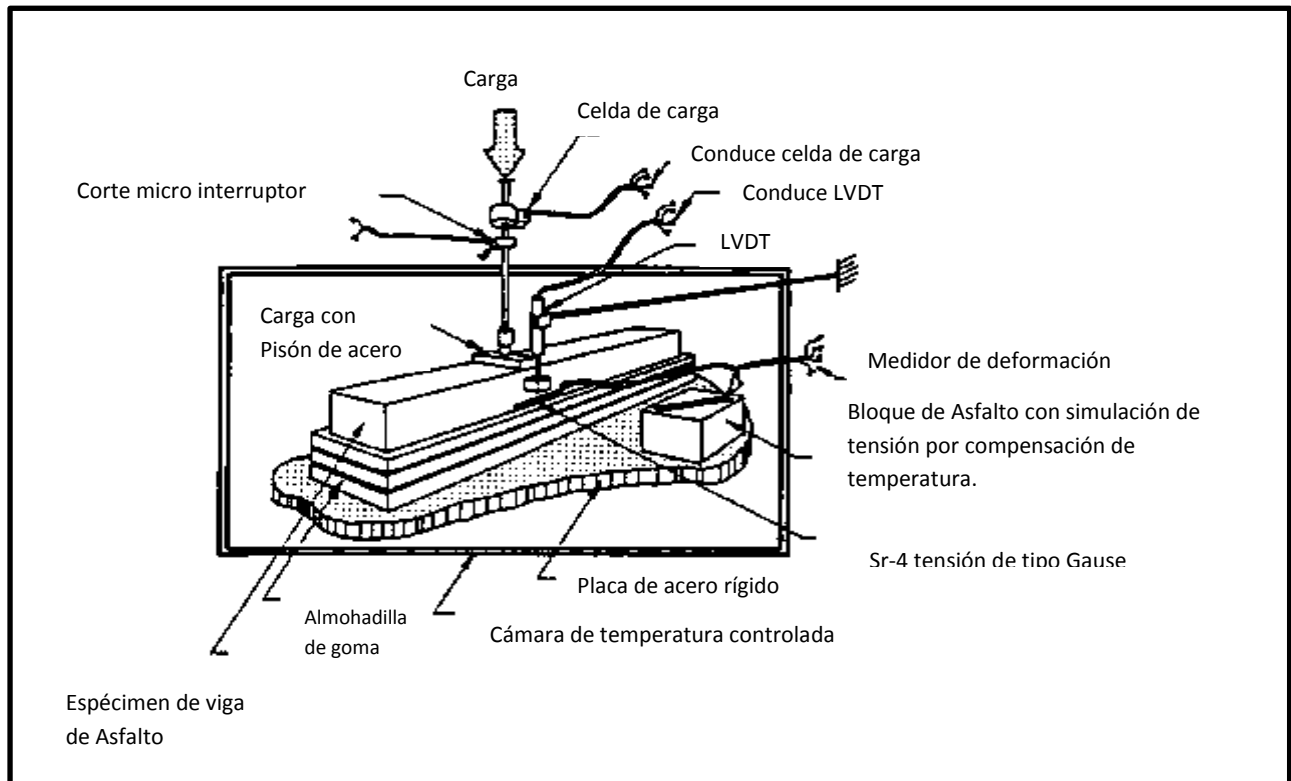


Figura 39. Viga de prueba de flexión con el apoyo de BARKSDALE. [25]

MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN DIRECTA

La prueba de tensión directa está normalizada por el estándar francés (NF T 98-260-1) y se realiza con el MAER (Máquina de prueba reológica). Esta prueba fue desarrollada por Linder (1977) y desarrollada por Moutier (1990). Se compone para una temperatura dada, para presentar una resistencia a la tensión de un cilindro de carga hasta un valor dado de deformación axial ϵ_{max} siguiendo un tipo de deformación de carga controlada $\epsilon = a.t^n$ con $0.5 < n < 2$ (Figura 40.). La prueba se continúa durante varios tiempo de carga t_i (mismo valor de ϵ_{max}).

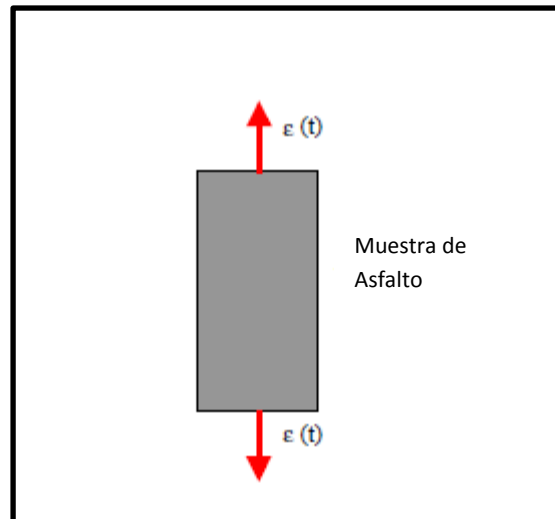


Figura 40. Esquema de la muestra y de la sollicitación en la prueba de tracción directa.

Según Linder [27], la prueba permite realizar fácil cada serie de pruebas proporcionando todas las variables útiles de diseño.

MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN-COMPRESIÓN

El ensayo puede realizarse en muestras de forma cilíndrica o prismática. El espécimen se somete a esfuerzos axiales de tensión tipo compresión alterna Figura 41. Para mantener fuera la fisuración en bordes y mejorar la prueba, puede ser extraída la probeta del centro.

El ensayo es homogéneo en la parte central de la muestra. Puede ser realizado en control de la deformación o tensión, que es raramente el caso para otros ensayos de fatiga. El módulo de rigidez, la relación de Poisson y austeras características mecánicas pueden ser aprendidas en base a la experiencia.

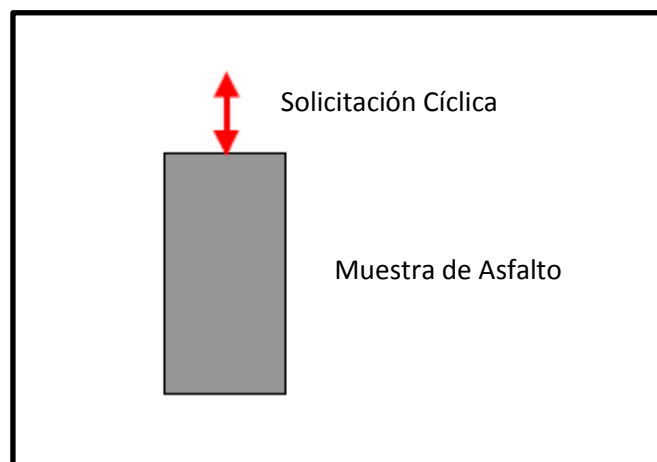


Figura 41. Diagrama de la muestra y sollicitación en el ensayo de tensión-compresión



Figura 42. Ensayo de Tensión-Compresión (ENTPE-Francia).

ENSAYO TRIAXIAL

Además de la precedente prueba de sollicitación de tensión-compresión, una presión de confinamiento se aplica sobre la muestra (Figura 43). Esta presión de confinamiento permite simular mejor el comportamiento de los pavimentos. En efecto, el ensayo triaxial permite aplicar esfuerzos laterales que existen en el caso de un pavimento real. En pruebas más complejas de esta área, la aplicación de la presión lateral puede también ser cíclica.

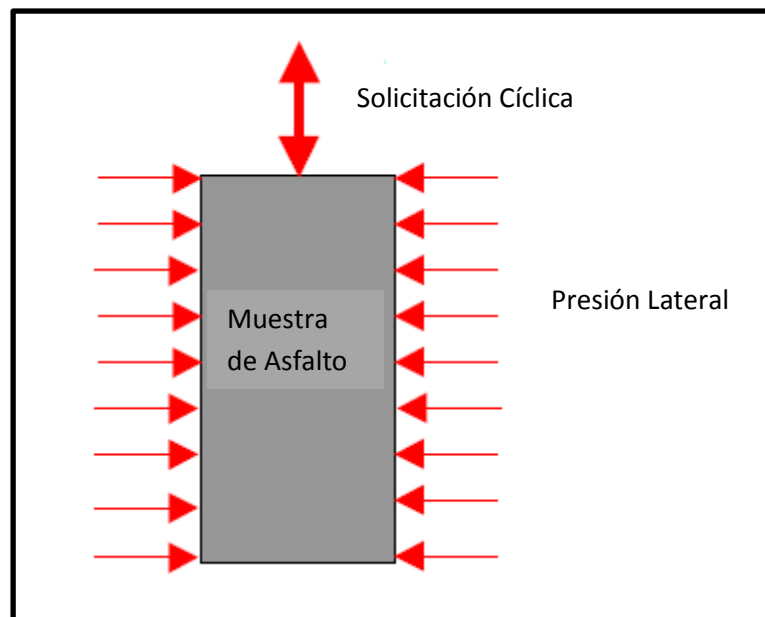


Figura 43. Esquema de la prueba y de la sollicitación en el ensayo triaxial.

MODO DE SOLICITACIÓN

Para la realización en laboratorio del ensayo de fatiga se pueden utilizar dos tipos de solicitaciones: solicitaciones sinusoidales en fuerza o solicitaciones sinusoidales en desplazamiento. El tipo de solicitación a aplicar depende del espesor de la capa y de su rigidez relativa. Generalmente se considera que [28]:

- Carpeta asfáltica delgada (< 6cm) es solicitada en deformación constante.
- Carpeta asfáltica gruesa (> 15 cm) es solicitada en esfuerzo constante.
- Carpeta asfáltica de espesor medio es solicitada en un modo intermedio.

Cualquiera que sea el modo seleccionado, durante el ensayo la rigidez de la probeta disminuye a causa del daño por fatiga.

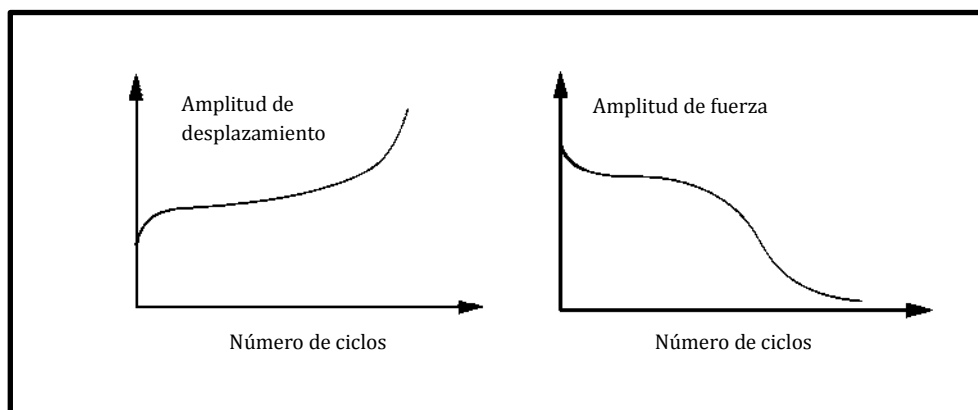


Figura 44. Evolución de la respuesta de acuerdo al modo de solicitación. Modo fuerza (izquierda), modo desplazamiento (derecha).

Para el caso en donde la solicitación es mantenida constante durante el ensayo, la amplitud del desplazamiento aumenta con el número de ciclos de solicitación hasta la ruptura de la probeta (Figura 44. izquierda) En el caso donde la amplitud de desplazamiento se mantiene constante, la amplitud de la fuerza disminuye hasta ser casi nula (Figura 44. Derecha).

TIPO DE SEÑAL

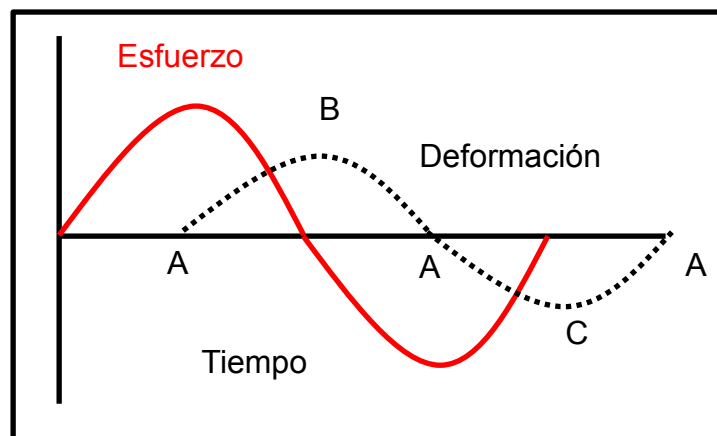
De acuerdo a lo mencionado anteriormente sobre el modo de sollicitación, se utiliza un tipo en específico de señal la cual es la señal sinusoidal, la cual es la que representa de mejor manera las sollicitaciones aplicadas al pavimento debido al paso de los vehículos.

Si los valores de una señal se repiten en intervalos iguales de tiempo, se dice que la señal es periódica. El período de la señal es el tiempo que tarda en repetirse por primera vez. Unas de las funciones periódicas más utilizadas son las señales “sinusoidales” (funciones seno o coseno).

La “frecuencia” de una señal periódica se refiere al número de ciclos que recorre en un segundo. La unidad de frecuencia es el Hertz (Hz) que es igual a un ciclo por segundo.

El “ángulo de fase” o “fase” de una señal se refiere a su desplazamiento hacia la derecha o la izquierda con respecto a una referencia. [29]

Gráfica 8. Gráfica de la Señal Sinusoidal.



CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

ANÁLISIS DE LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

CRITERIOS DE EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ

CRITERIO CLÁSICO DE FATIGA

En el criterio clásico, la probeta se considera en "ruptura" si su módulo llega a la mitad de su valor inicial medido en el primer ciclo de carga bajo las mismas condiciones de ensayo (misma temperatura y frecuencia). La vida útil N_f es entonces el número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial.

Tomando en consideración el modo de sollicitación, se tendrá que:

- Fuerza $\text{inicial} = \frac{1}{2}$ Fuerza inicial para los ensayos en desplazamiento constante.
- Desplazamiento $\text{final} = 2$ Desplazamiento inicial para los ensayos en fuerza constante.

La Figura 45. Presenta el principio de obtención de la curva de Wöhler. Especialmente se presenta un ensayo realizado en control de fuerza y tomando en consideración el criterio clásico de fatiga.

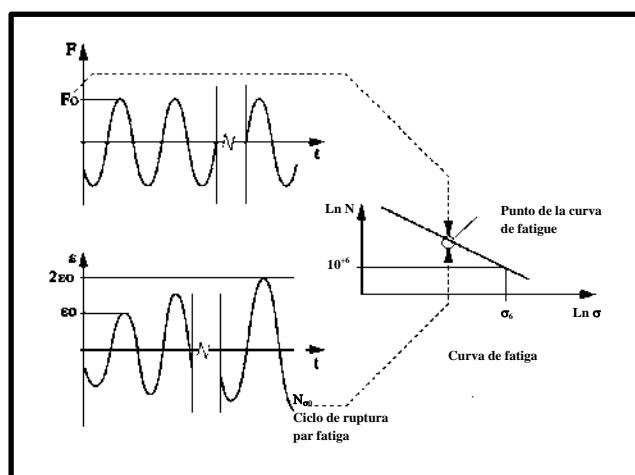


Figura 45. Principio de obtención de la curva de Wöhler para el ensayo en control de fuerza.

CRITERIO DE FRACTURA

Este criterio considera el valor de N_f como el número de ciclos al momento de la ruptura de la probeta. Este criterio es menos utilizado que el criterio clásico ya que este fenómeno solo se presenta en ensayos en modo de fuerza. Para este tipo de ensayos, la ruptura de la probeta siempre se presenta. Por el contrario, los ensayos en modo de desplazamiento, frecuentemente la probeta no se rompe.

Para los ensayos en fuerza controlada, no existen diferencias significativas entre las duraciones de vida definidas a la ruptura de la probeta y las definidas por la reducción de la mitad del módulo de rigidez. [28]

CRITERIO DE LA CURVA DE WEIBULL

Este criterio propone presentar el ensayo de fatiga en los ejes $[\ln(\ln(N)) - \ln(-\ln(SR))]$. La curva obtenida es denominada “la curva de Weibull” [30]. En esta representación, SR es definido como la relación entre el módulo de rigidez en el ciclo N (E_N) y el módulo inicial (E_0).

Los autores distinguen tres fases del ensayo a partir de esta curva. La primera fase es el calentamiento hasta una temperatura de equilibrio. La segunda fase es la aparición de la fisuración y la tercera es la propagación de las fisuración. En ciertas curvas, los autores constatan la ausencia de la fase I. Se propone la fase III de la curva como la fase de ruptura.

PROPAGACIÓN DE ONDAS ULTRASONORAS (US)

La medición de ondas ultrasonoras forma parte de los métodos no destructivos utilizados en mezclas asfálticas. La medición de propagación de ondas en la mezcla asfáltica, se realiza utilizando un dispositivo ultrasonoro (US) innovador, que permite medir la propagación de ondas P (ondas a compresión) durante la realización del ensayo de fatiga. Este dispositivo ha sido desarrollado por Houel y Arnaud [23]. La figura 46 es una representación de la señal emitida y recibida por el dispositivo de medición.

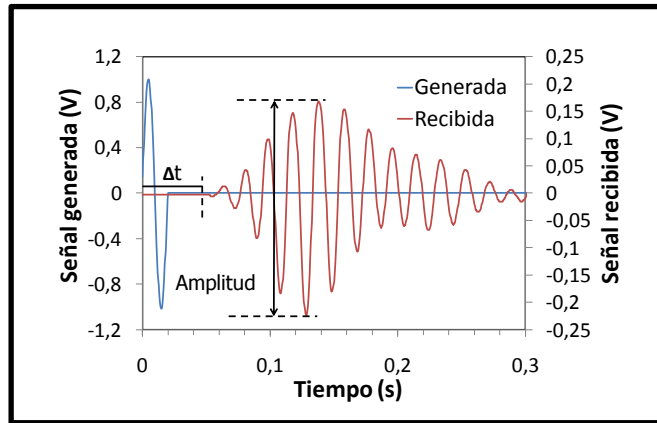


Figura 46. Análisis de señales de ondas P (compresión) en mezclas asfálticas.

Durante el ensayo de fatiga, la disipación de la energía es claramente medida con el dispositivo US. La disipación de la energía es calculada de la amplitud de la señal recibida, y está definida como la relación entre la energía recibida y la energía recibida en el ciclo de energía de carga inicial.

Esta característica puede ser comparada con el criterio de daño obtenido de la respuesta mecánica de la mezcla asfáltica [31]. Para su análisis se utiliza el criterio clásico de ruptura (50% de la energía disipada), cabe mencionar que el dispositivo que ayuda a medir las US es un equipo adicional.

ENFOQUES EN TÉRMINOS DE DAÑO

El daño es considerado como una degradación progresiva de las propiedades mecánicas del material hasta su ruptura.

La variable de daño D es definida, tal que;

$$0 \leq D \leq D_c \leq 1$$

0 = Cuando el material está intacto.

$D = D_c$ caracteriza el estado de daño del material, en donde D_c es el límite de validez de la hipótesis de daño, para los valores superiores la degradación sigue según un proceso de macrofisuración.

1- material de ruptura, según el criterio establecido.

Para introducir esta variable de daño que representa la degradación del material, se pueden medir las magnitudes físicas (densidad, resistencia, etc.) o, en una escala de microestructura, medir la densidad de cavidades o de microfisuras.

La utilización de mediciones mecánicas globales (características de elasticidad, plasticidad) facilita la tarea gracias a la noción de esfuerzo efectivo. [32]

Esfuerzo efectivo: σ_{efectivo}

Bajo la hipótesis de un daño isótropo (fisuras orientadas uniformemente en todas las direcciones del espacio), "D" es un escalar que representa una fracción de la superficie del material degradado. Se introduce así la noción de esfuerzo efectivo, el cual corresponde al esfuerzo real aplicado sobre el material intacto (no dañado).

Asumiendo que el daño reduce la superficie efectiva que resiste la sollicitación, se puede definir entonces la superficie dañada como S_D . La superficie efectiva S_{efectiva} evoluciona durante la degradación y puede escribirse como:

$$S_{\text{efectiva}} = S - S_D = S(1-D) \quad (14)$$

Entonces:

$$\sigma_{\text{efectivo}} = \sigma(S/S_{\text{efectivo}}) \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{efectivo}} = \sigma/(1-D) \quad (16)$$

La aplicación del concepto de esfuerzo efectivo en un ensayo tridimensional permite definir el daño como:

$$\sigma_{\text{efectivo}} = E_0 \varepsilon \quad (17)$$

Con E_0 correspondiendo al módulo del material intacto, se deduce que:

$$D = 1 - \sigma/E_0 \varepsilon \quad (18)$$

Esta relación muestra que es posible cuantificar experimentalmente el grado de daño de un material a partir de un ensayo uniaxial. En efecto, sabiendo que:

$$E_{\text{efectivo}} = \sigma/\varepsilon \quad (19)$$

Se tiene:

$$D = 1 - E_{\text{efectivo}}/E_0 \quad (20)$$

E_{efectivo} = es el módulo del material dañado.

El parámetro D caracteriza una pérdida relativa del módulo entre el estado inicial y el estado del material al instante t.

$$D = 1 - \frac{|E(t)|}{|E(0)|} \quad (21)$$

Para un material viscoelástico, los valores de módulo corresponden a la norma del módulo complejo al instante considerado. Para el caso de una sollicitación sinusoidal, el tiempo es expresado por el número de ciclos de sollicitación. El valor de D en el ciclo N es entonces dado por la relación:

$$D = 1 - \frac{|E_{(N)}^*|}{|E_{(0)}^*|} \quad (22)$$

ÍNDICE DE DAÑO

El tratamiento de resultados del ensayo de fatiga está basado sobre una metodología desarrollada en el Departamento de Ingeniería Civil y Edificios (DGCB siglas en francés) de la Escuela Nacional de Trabajos Públicos del Estado (ENTPE) [32, 6]. Esta metodología propone un procedimiento para el cálculo de índice de daño para un ciclo de carga.

Este cálculo toma en consideración la no-linealidad del daño con el número de ciclos y corrige la influencia de fenómenos parásitos que aparecen durante los ensayos de fatiga. Este análisis combina dos de las gráficas utilizadas con anterioridad: la evolución del módulo y la evolución de la energía disipada.

El análisis es realizado en tres intervalos:

- Intervalo 0 [40 000 – 80 000 ciclos],
- Intervalo 1 [50 000 – 150 000 ciclos],
- Intervalo 2 [150 000 – 300 000 ciclos]

Para cada uno de esos tres intervalos y a partir de los resultados experimentales, se calculan diversos parámetros para determinar el índice de daño por ciclo de carga de cada intervalo. Las figuras 47 y 48 muestran los parámetros calculados por intervalo ($i = 0, 1$ o 2). N_{1i} y N_{2i} representan el número de ciclos al inicio y al final del intervalo i .

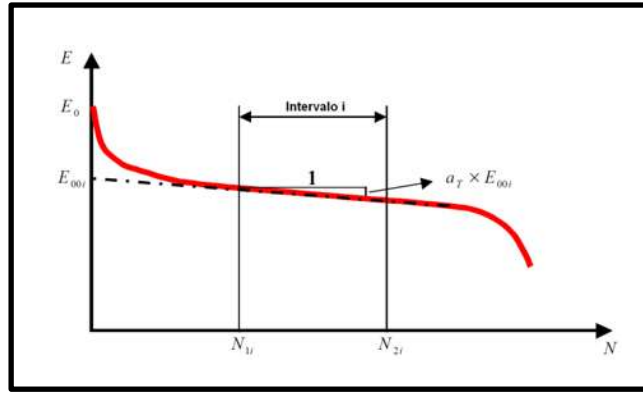


Figura 47. Definición de parámetros obtenidos en la curva de evolución del módulo en función del número de ciclos.

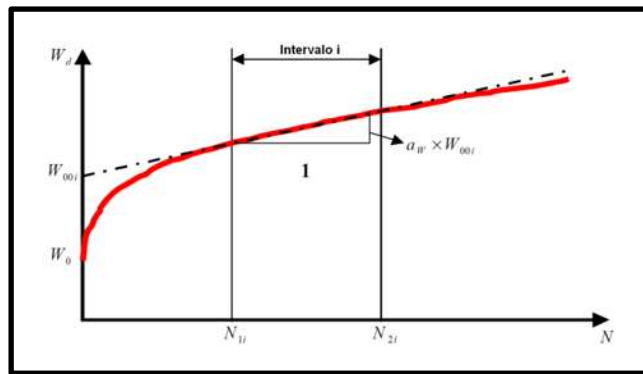


Figura 48. Definición de parámetros obtenidos en la curva de evolución de la energía disipada en función del número de ciclos.

Para cada ciclo intervalo evaluado se determinara la pendiente de fatiga (a_F). a_F es la pendiente obtenida después la corrección de la no-linealidad del daño, y es calculada de la siguiente forma:

$$a_F = a_T + a_W \frac{C_1 * \Delta E_I}{E_{00i}} \quad (23)$$

En donde $\Delta E_1 = E_0 - E_{00i}$

C_1 es un coeficiente de corrección de la no-linealidad del daño. Su valor no depende del ensayo si no del intervalo evaluado. Los valores de C_1 son: 4/5, 3/4, 2/3 para los intervalos 0, 1 y 2.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS

Diversas curvas son utilizadas para la presentación de los resultados del ensayo de fatiga. Estas curvas sirven en un primer tiempo a verificar la validez del ensayo y para observar la evolución de las características mecánicas en función del tiempo y así tener una idea de la aparición y evolución de las fisuras en la probeta.

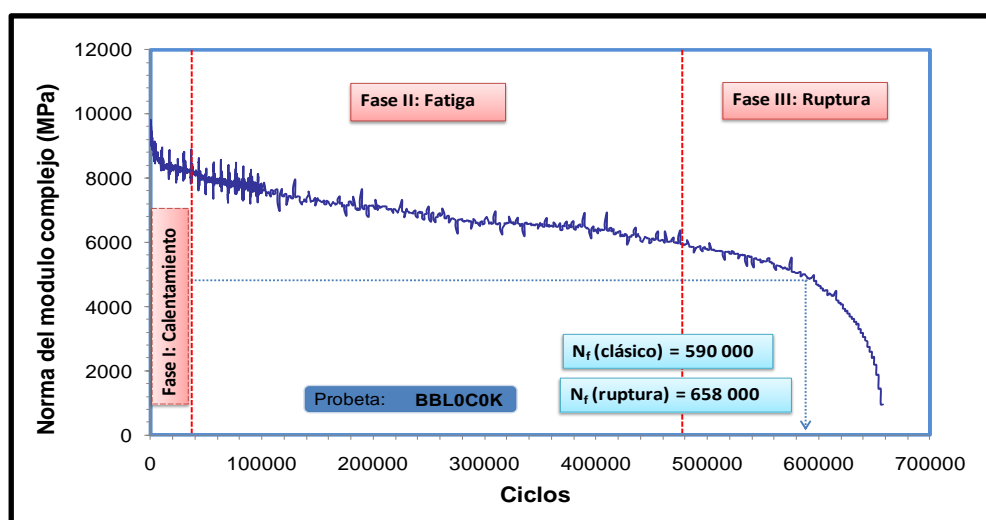
Las gráficas que se presentan fueron obtenidas de un ensayo de tensión-compresión en esfuerzo controlado (σ de 0.53 Mpa.). Los ensayos fueron realizados a una temperatura de ensayo de 15°C y una frecuencia de 10 Hz. La deformación fue medida por medio de 3 extensómetros espaciados 120° alrededor de la probeta.

EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS DE LA MEZCLA

La primera curva que se presenta (Gráfica 9), es la evolución del módulo complejo en función del número de ciclos de carga. Esta curva en particular sirve para determinar dos criterios de "ruptura" de la mezcla asfáltica, el criterio clásico y criterio clásico de ruptura de la probeta.

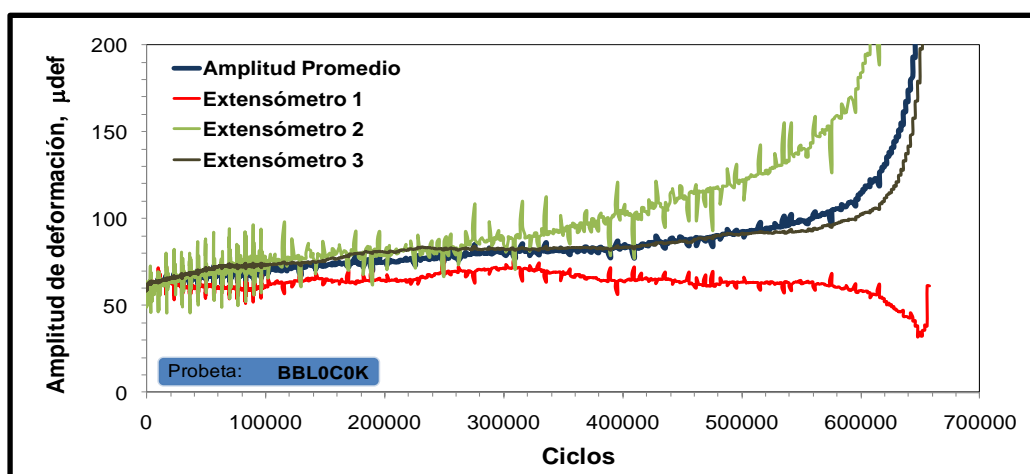
En la Gráfica 9 se puede observar claramente las tres fases del ensayo de fatiga. La primera fase se presenta en los primeros 37000 ciclos hasta un valor de 7800 Mpa. Seguido de la evolución cuasi-lineal durante la segunda fase, hasta que las deformaciones se acentúan a partir del ciclo 500 000, que es el punto de inicio de la tercera fase.

Gráfica 9. Evolución del Módulo Complejo en Función del Número de Ciclos de Carga.



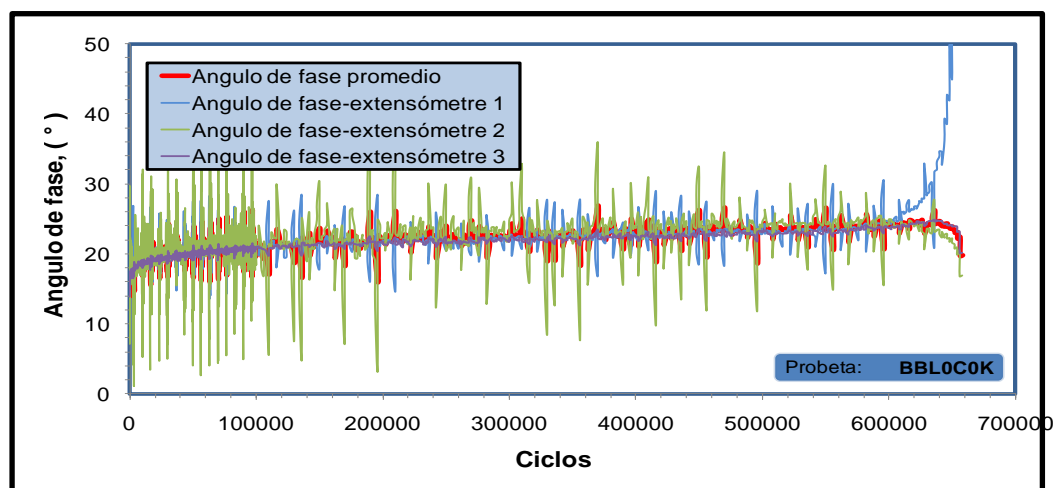
La Gráfica 10 presenta la evolución de la amplitud de deformación en función del número de ciclos de carga. Se observa que la deformación promedio aumenta a lo largo del ensayo. En el inicio del ensayo, esta deformación aumenta rápidamente debido a la caída del módulo. Después, la deformación promedio sigue aumentando pero a velocidad moderada. Al final del ensayo la diferencia entre los tres extensómetros aumenta considerablemente, influenciados por la aparición de microfisuras.

Gráfica 10. Evolución de la Deformación en Función del Número de Ciclos de Carga.



Para el caso del ángulo de fase su valor aumenta durante todo el ensayo. En los primeros ciclos se observa un aumento rápido, pasando a un aumento ligero pero constante, en la fase final se obtiene un aumento abrupto de su valor, evidenciando la fase de ruptura (Gráfica 11). La variación del ángulo de fase es un parámetro ligado a la fatiga y al daño en la probeta.

Gráfica 11. Evolución del Ángulo de Fase en Función del Número de Ciclos de Carga. [33]



CAPÍTULO 6

EJEMPLO PRÁCTICO

EJEMPLO PRÁCTICO

En este presente capítulo se presentará a modo de ejemplo práctico, las diferentes actividades que se realizaron en el desarrollo de la prueba de fatiga, para la cual se siguieron los parámetros que especifica la norma ASTM Designación D7460-08 (Método de prueba estándar para determinar la falla por fatiga del concreto asfáltico compactado sometido a flexión repetida, (Ver Anexo 1)), la cual se llevó a cabo en el Laboratorio de Asfaltos y Mezclas Asfálticas en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), con el asesoramiento del Dr. Horacio Delgado Alamilla y de la M. en I. Mayra Flores Flores, los cuales se encontraron a cada momento supervisando dicho procedimiento de la prueba.

Inicio presentando la imagen del equipo (Figura 49 y 50) que nos ayudará a ejecutar la prueba de fatiga, este equipo está diseñado para que pueda desempeñar varias pruebas de las cuales podemos destacar la prueba de Módulo Dinámico y la prueba de Fatiga en la cual este trabajo se desenvuelve.



Figura 49. Imagen del Equipo Utilizado en la Prueba de Módulo Dinámico y Fatiga. Figura 50. Compresor y Equipo de Cómputo Donde se registra la Información de la Prueba.

José Eduardo García Servín.

Antes de llegar a ensayar las vigas de prueba para la Fatiga en el equipo antes mostrado, es necesario elaborar las vigas de las siguientes dimensiones: 400 mm de largo, 75 mm de Ancho, 75 mm de alto. Como se observa en la Figura 53. Estas son elaboradas en un Compactador Lineal (Figura 51 y 52), las características de la mezcla asfáltica dependen del proyecto a realizar. Estos materiales deben cumplir con los diversos ensayos y especificaciones del Protocolo AMAAC mencionadas en el Capítulo I y II.



Figura 51. Imagen del Equipo Compactador Lineal y su Modo de Control.



Figura 52. Vista Interior del Compactador Lineal.

José Eduardo García Servín.

Después de haber fabricado las vigas en el Compactador Lineal (Figura 52), procedemos a obtener sus características volumétricas, se realiza la prueba de Gravedad específica bruta neta con parafina si el agregado excede del 2% de absorción (ASTM D2726-09) y si el material tiene un porcentaje menor al 2% de absorción se utiliza la prueba Gravedad específica bruta neta sin parafina (ASTM D1188-07).

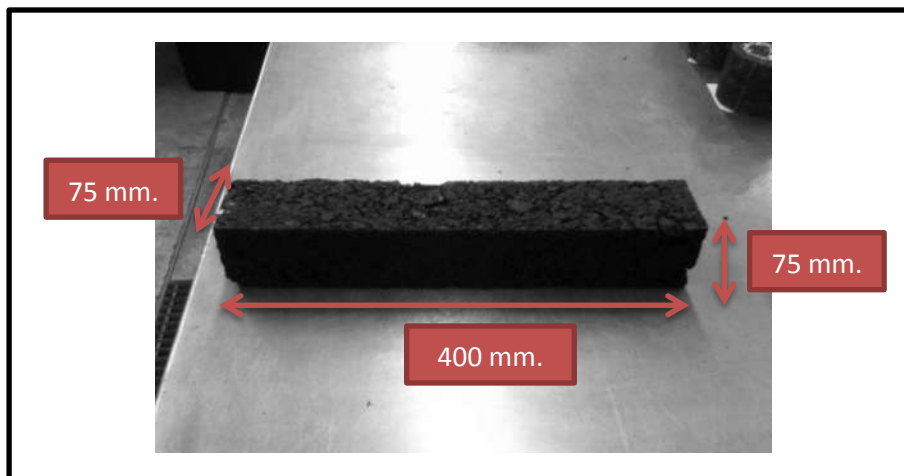


Figura 53. Imagen de la Viga y sus Dimensiones. José Eduardo García Servín.

Posteriormente a las características volumétricas procedemos a serrar cada una de las caras de las vigas (Figura 54) para poder obtener las dimensiones que especifica la norma, las cuales se requieren para fijar la viga en el equipo de prueba a la Fatiga.



Figura 54. Imagen de la Viga en la Sierra de Corte, con la cual se modifican las dimensiones hasta Contar con las que Indica la Norma. José Eduardo García Servín.

Después de aserrar las vigas y obtener las dimensiones especificadas en la Norma (380 ± 6 mm. de largo, 63 ± 2 mm. de ancho y 50 ± 2 mm. de altura), las vigas quedan de la siguiente forma (Figura 55), listas para ser montadas en el equipo de prueba y poder determinar su Vida a la fatiga.



Figura 55. Imagen de las Vigas de prueba recién aserradas. José Eduardo García Servín.

Ya que tenemos nuestras vigas a las dimensiones que especifica la norma para este ensayo, procedemos a montar nuestra viga en el equipo GCTS para Fatiga (Figura 57 y 58), el cual cuenta con un instrumento de medición (LVDT), este se encuentra en la parte inferior donde se apoya la viga, el LVDT cuenta con un rango de desplazamiento, medición y control de 0 a 5 mm. (0 a 0.2 in.), una resolución de $2.5 \mu\text{m}$ (9.8×10^{-5} in.) y una precisión de $5 \mu\text{m}$ (2.0×10^{-4} in.).

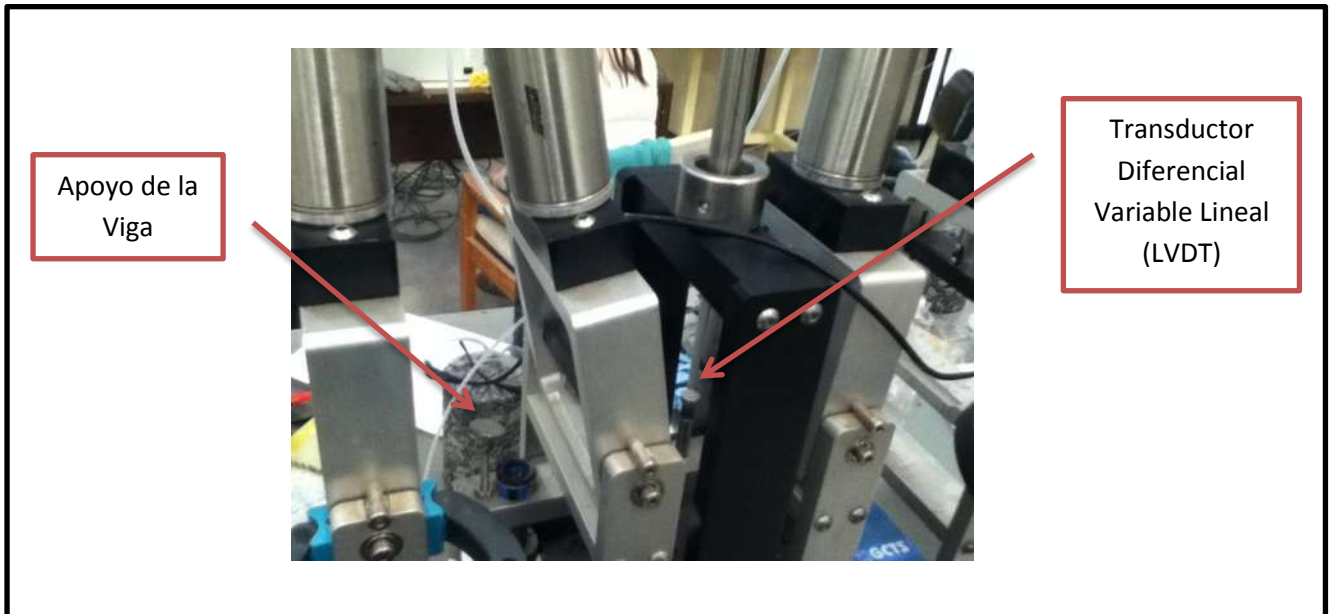


Figura 56. Vista a detalle del Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT).

El cual nos proporcionara el valor de la deflexión aplicada a dicho ensayo, la cual se mide en el centro de la viga que es donde se encuentra colocado el LVDT. La fuerza y el esfuerzo aplicado lo podemos medir gracias a una celda de carga que registra los valores y los transmite al equipo, esta celda se encuentra ubicada en la parte superior de la cámara de temperatura, exactamente donde se encuentra el pistón que provoca el movimiento (Figura 60). Gracias a estos valores registrados por el equipo podremos determinar la Vida a la Fatiga de nuestra viga.



Figura 57. Imagen del equipo utilizado en el ensayo a la Fatiga con Viga de 4 Puntos.



Figura 58. Colocación de la Viga en el equipo de Fatiga.

José Eduardo García Servín.

Ya que la viga se encuentra colocada de manera adecuada en el equipo como se muestra en la Figura 59. Procedemos a llevar el equipo a la cámara de temperatura, la cual cuenta con un sistema de enfriamiento que nos proporciona la temperatura que se le solicite para el ensayo. Adicionalmente hay un compresor de aire, el cual nos ayuda a accionar las abrazaderas que fijan la viga al sistema.

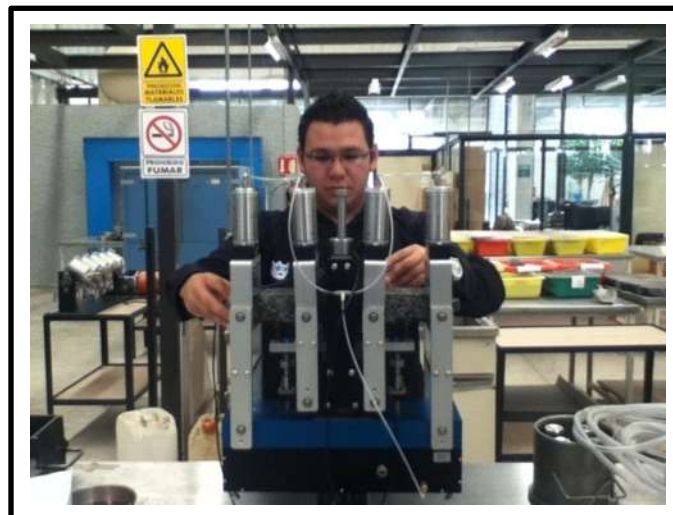


Figura 59. Colocación Completa de la Viga en el Equipo GCTS de Fatiga. José Eduardo García Servín.

Ya que tenemos el equipo colocado en el interior de la cámara de temperatura, procedemos a realizar la conexión del LVDT, así como del equipo de 4 puntos que sostiene la viga a la base de la cámara de temperatura (Figura 60.), para proceder a calibrar nuestro equipo con la temperatura y frecuencia de ensayo tal y como lo especifica la norma (Ver Anexo 1).

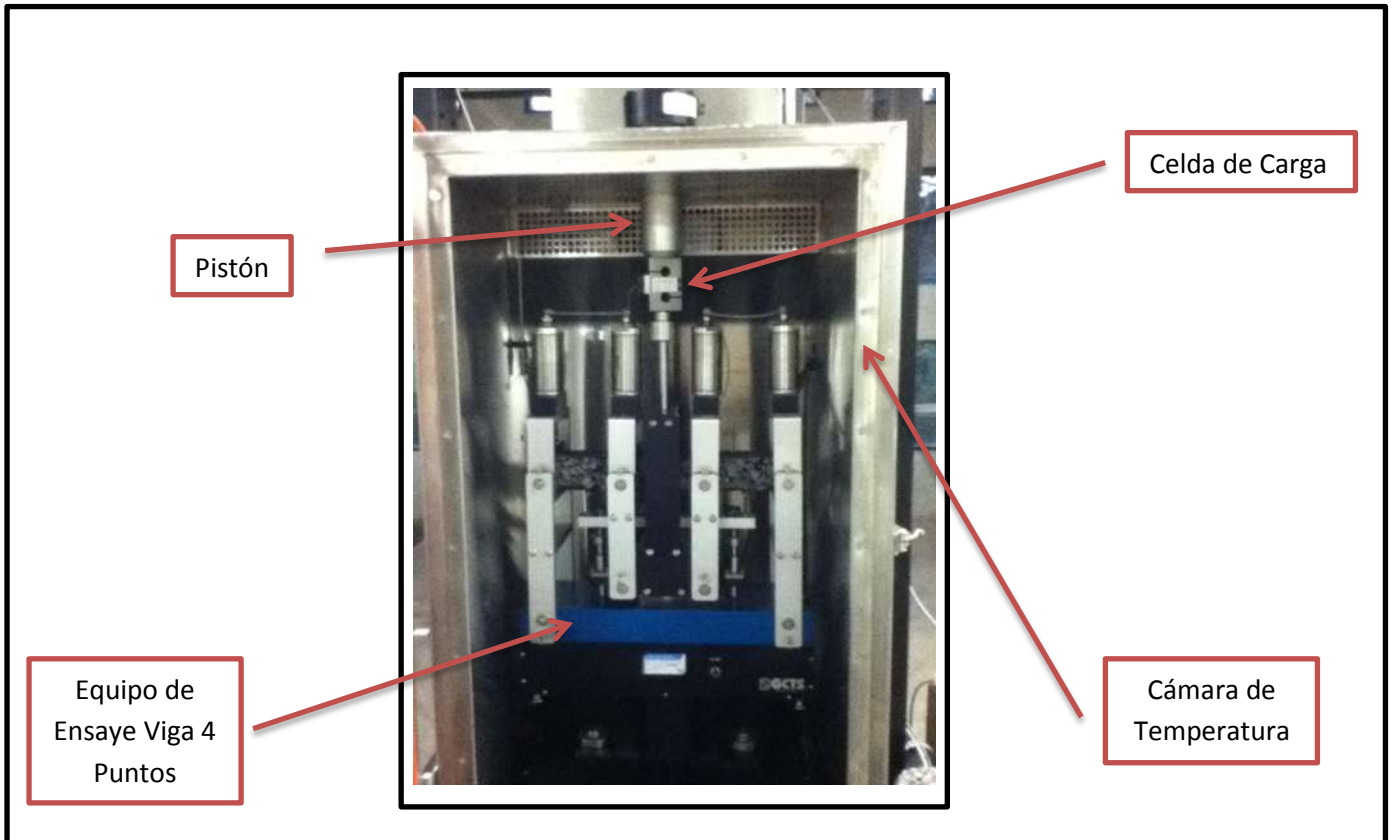


Figura 60. Imagen del Equipo de Prueba a la Fatiga en Viga de 4 Puntos dentro de la Cámara de Temperatura. José Eduardo García Servín.

Con ayuda del sistema de registro de datos automatizado con el que cuenta el equipo de prueba podremos registrar la evolución en tiempo real de las propiedades mecánicas de la muestra que nos ayudaran a formar las gráficas representativas de la fatiga.

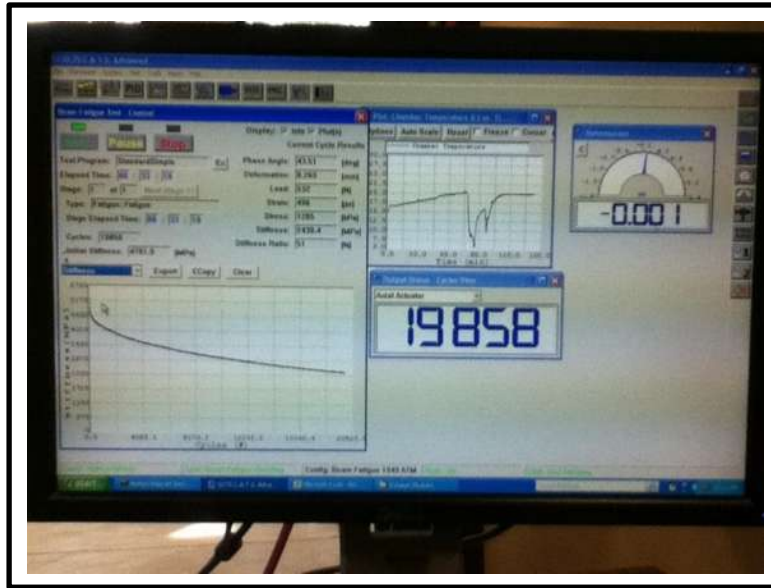


Figura 61. Imagen de la Pantalla de Registro de Datos de la Prueba, en la cual se observa en la parte inferior izquierda la gráfica de Rigidez vs Número de Ciclos.

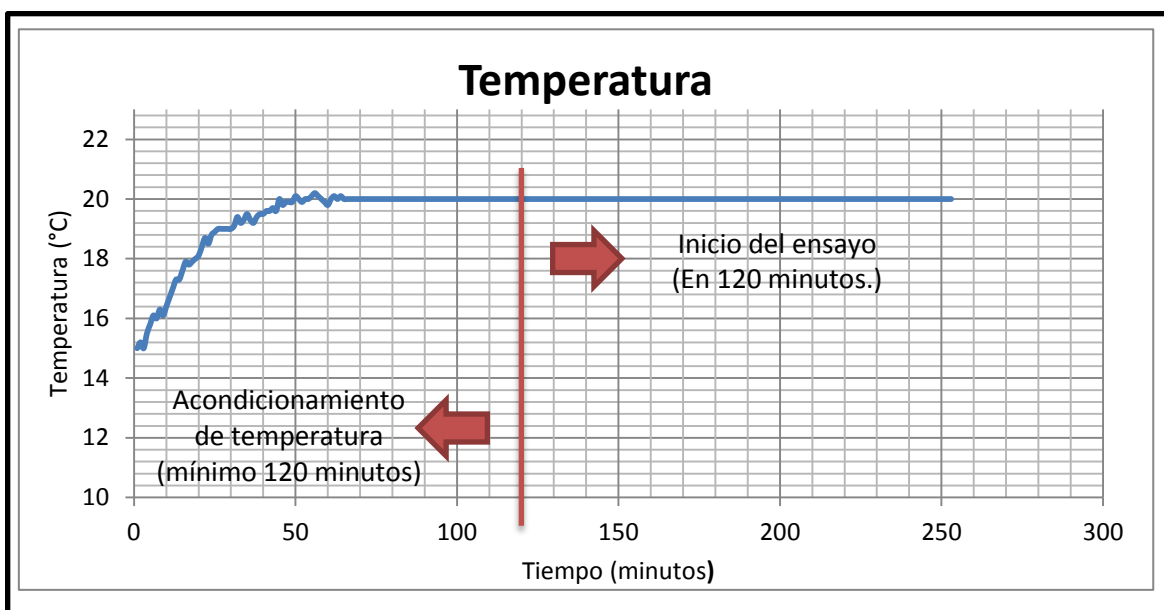
José Eduardo García Servín.

Como se menciona en el capítulo 5 existen diversos criterios de falla. El tiempo de ensayo está relacionado según sea el tipo de criterio seleccionado. El criterio más clásico es el 50% del módulo de rigidez inicial (Criterio Clásico de Fatiga), para nuestro caso se decidió detener el ensayo para un valor de 30% del módulo de rigidez inicial, con el fin de poder evaluar diferentes criterios con los resultados del ensayo.

PRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS

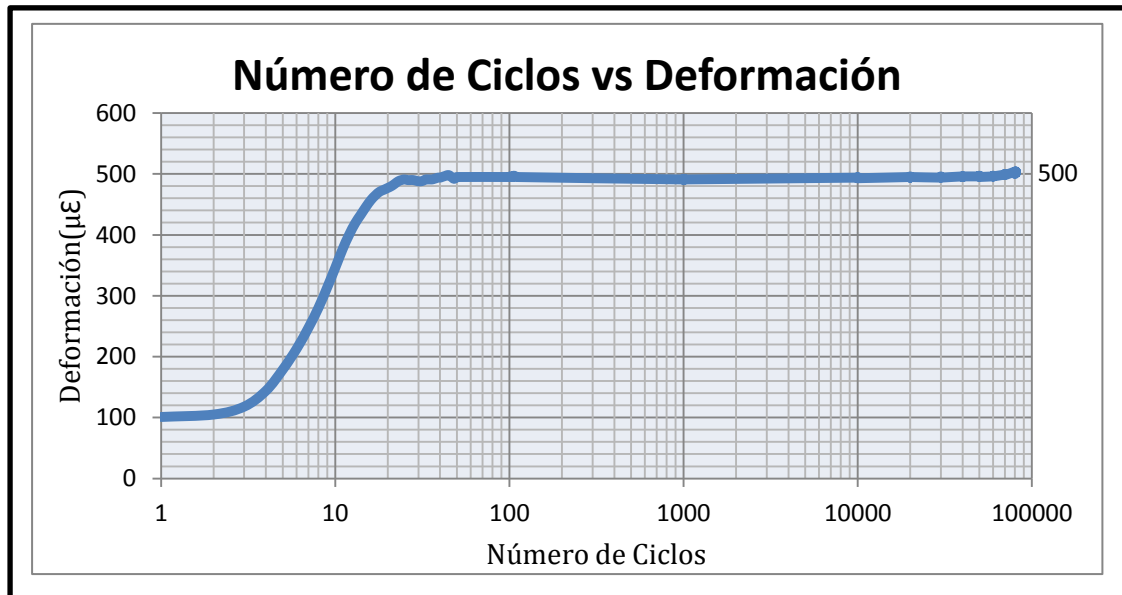
En esta sección se presentan los gráficos que se obtuvieron con los datos registrados por el equipo de prueba después de que terminó el ensayo de fatiga, los cuales corresponden siempre a una relación del número de ciclos con los diversos datos que arroja el ensayo, tales como el ángulo de fase, deformación, carga, módulo de rigidez, etc. Todos estos gráficos nos ayudaran para poder tener la certeza de cómo se comportó el espécimen de prueba. Cabe mencionar que las gráficas fueron obtenidas de un ensayo en viga de 4 puntos con modo de sollicitación de desplazamiento controlado de 500 microdeformaciones ($500 \mu\epsilon$), la temperatura de ensaye fue de 20°C y una frecuencia de 10 Hz. Estos datos fueron recibidos por medio de un sensor LVDT.

Gráfica 12. Evolución de la Temperatura en Función del Tiempo. José Eduardo García Servín.



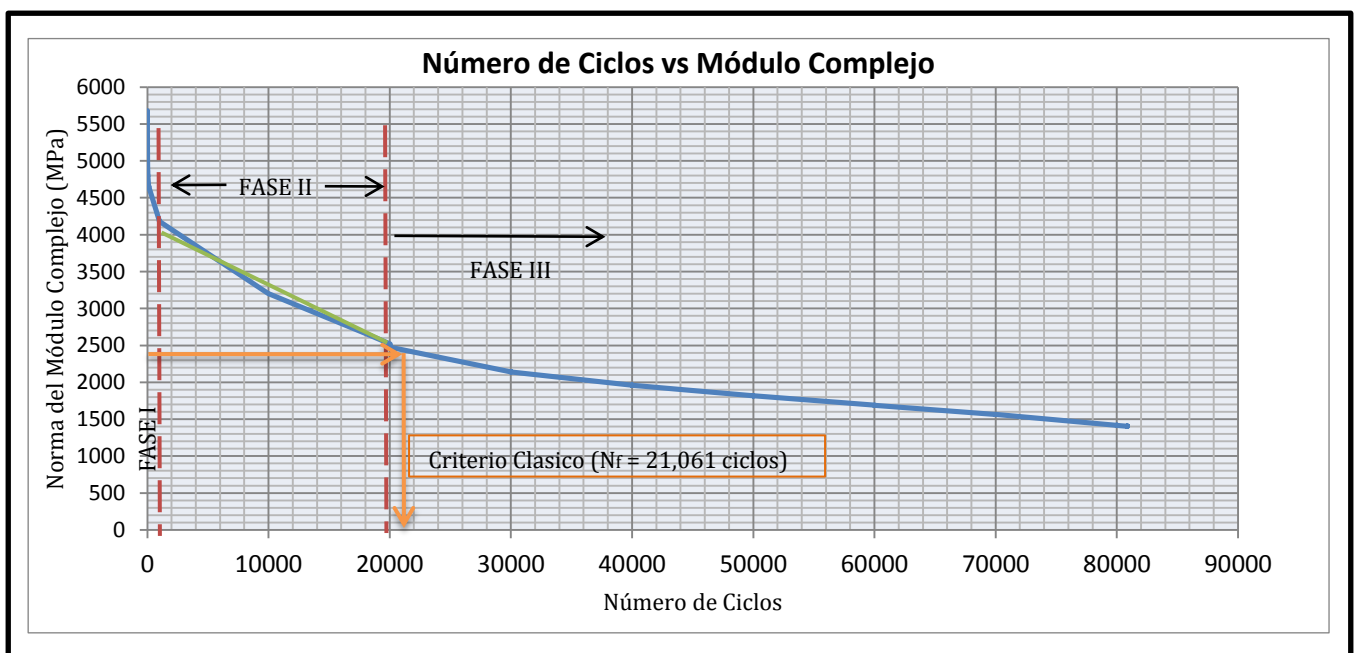
En esta gráfica podemos observar cómo se comportó la temperatura antes y durante el ensayo, esto debido a que se debe acondicionar y regular la temperatura por lo menos 2 hrs. antes del ensayo, para que la cámara de temperatura no presente alteraciones durante la prueba. Así los resultados serán los correctos para la temperatura ensayada.

Gráfica 13. Evolución de la Deformación en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.



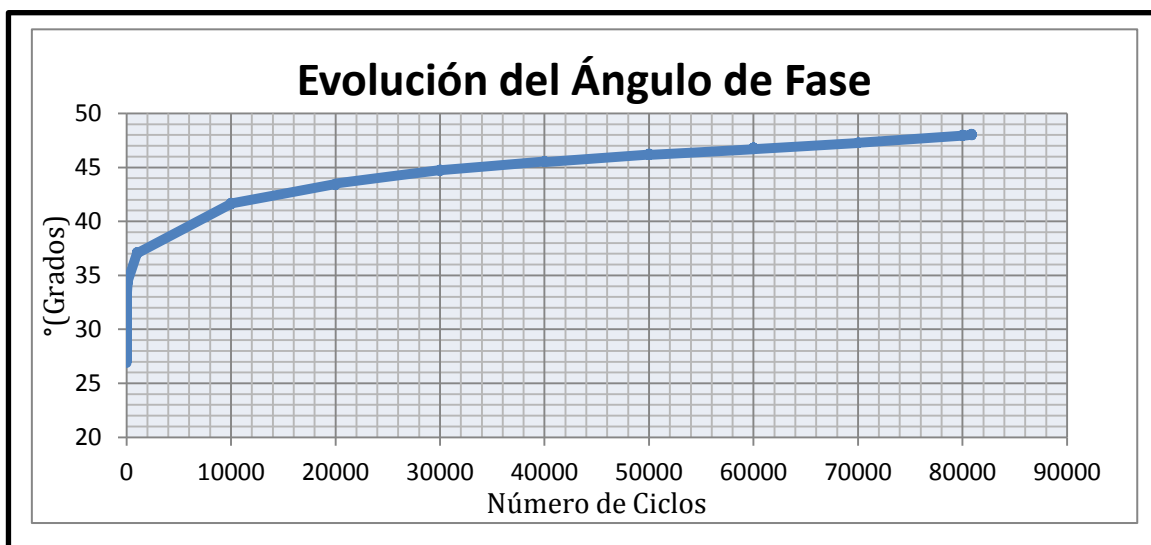
La gráfica anterior se presenta en función logarítmica, esto para poder observar de mejor manera su evolución al paso de los ciclos de carga. Se puede apreciar que después del ciclo número 20 la tendencia de la gráfica es de forma lineal, esto debido a que la deformación fue controlada de que no excediera las 500 $\mu\epsilon$ aproximadamente. Estos parámetros se controlan al inicio de la prueba.

Gráfica 14. Evolución del Módulo Complejo respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.



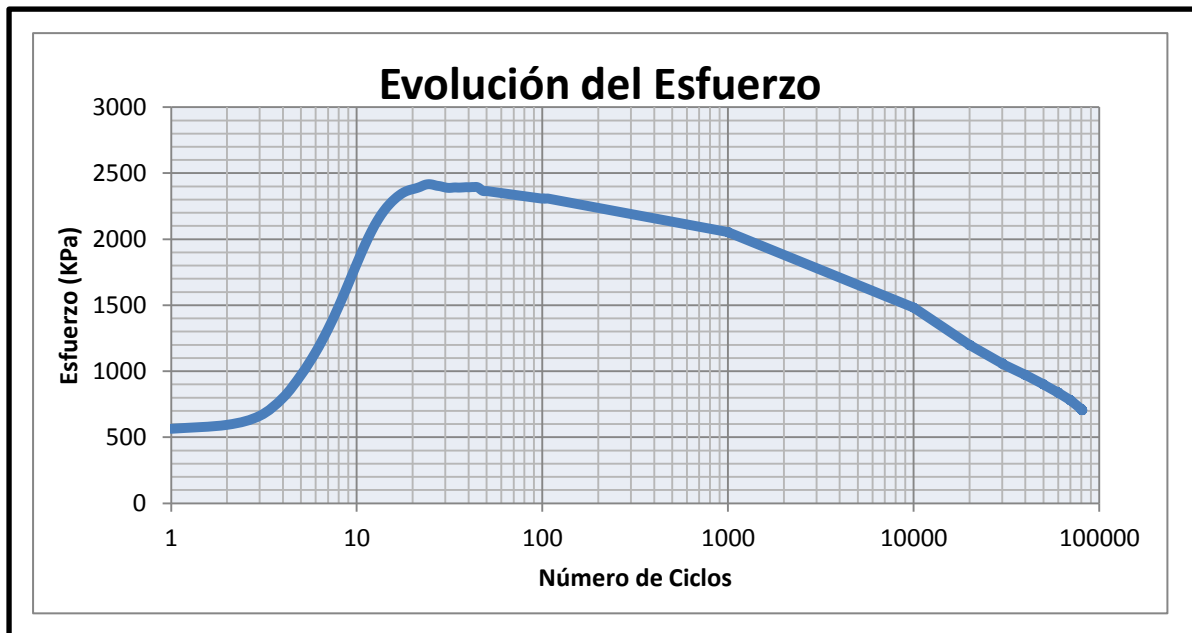
En este gráfico se puede observar claramente cómo se comporta el espécimen en todo el transcurso de la prueba, se puede apreciar las 3 fases de fatiga (Fase I: Calentamiento; Fase II: Fatiga; Fase III: Ruptura), así como el valor obtenido por medio del Criterio Clásico de Fatiga que presenta un $N_f = 21,061.86$ con un valor de Módulo de 2,390.95 Mpa.

Gráfica 15. Evolución del Ángulo de fase en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.

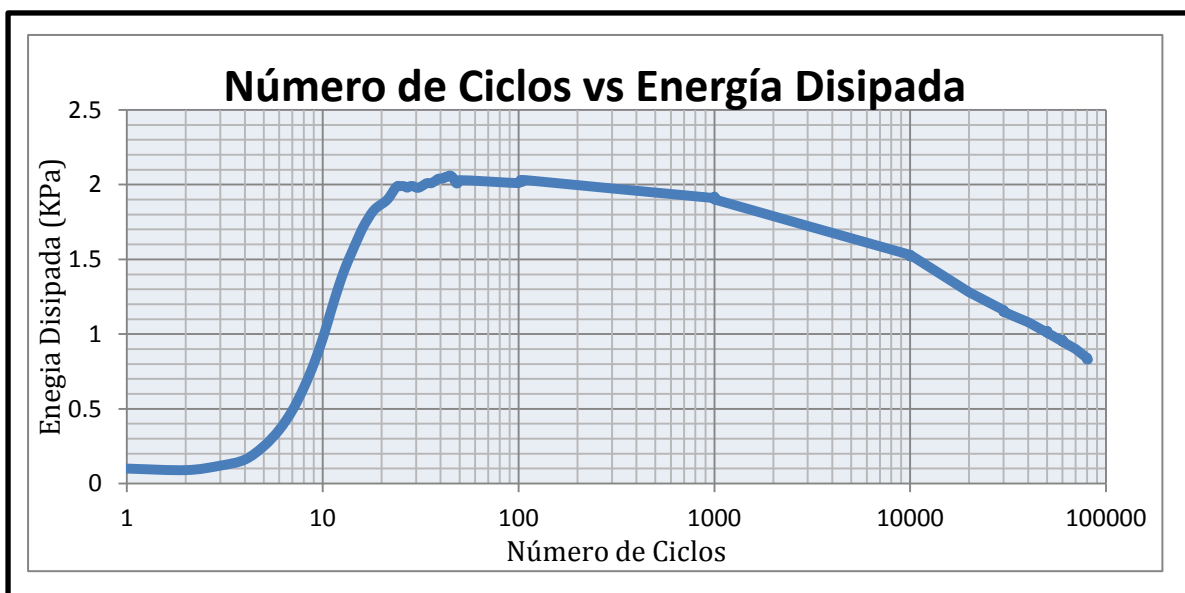


Con ayuda de la gráfica anterior podemos observar claramente cómo fueron evolucionando los valores del ángulo de fase en el transcurso de la prueba, esto nos informa como es que iba sufriendo daño el espécimen primeramente con un aumento fuerte inicial del ángulo y después un aumento constante tras el pasar de los 10,000 ciclos de carga.

Gráfica 16. Evolución del Esfuerzo Aplicado en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.



Gráfica 17. Evolución de la Energía Disipada respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.



Para poder realizar la gráfica de la energía disipada es necesario representar los datos en KPa. Para esto es necesario utilizar la formula (24), la cual nos dará el resultado que tendremos que graficar vs el número de ciclos de carga.

$$W_d = [(\pi)(\sigma)(\varepsilon)((\sin(\theta)))] \quad (24)$$

Donde:

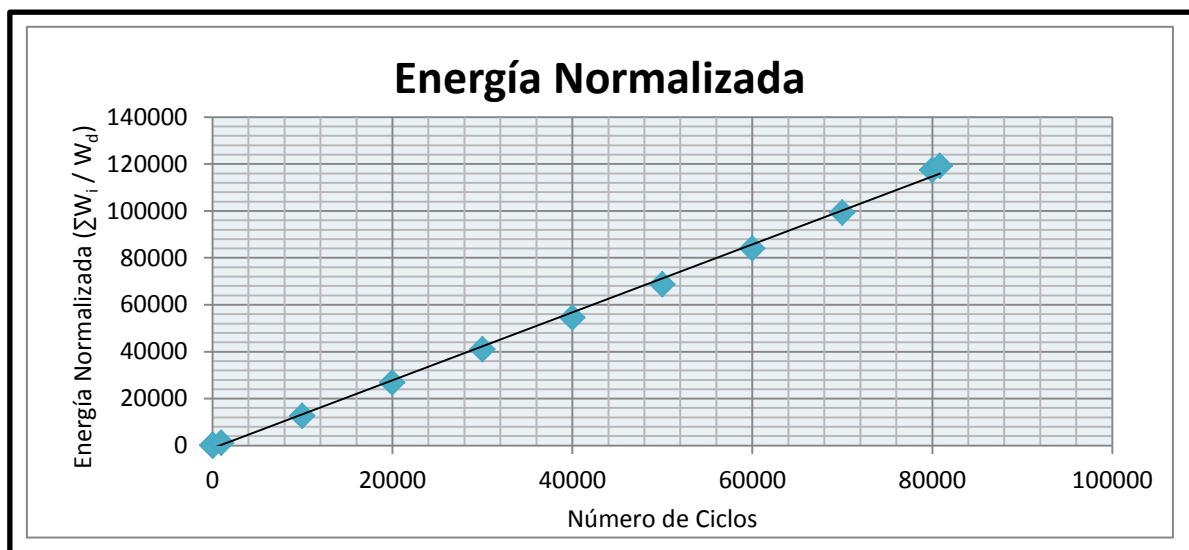
W_d = Energía Disipada

σ = Esfuerzo Aplicado (KPa.)

ε = Deformación (mm.)

θ = Ángulo de Fase (°)

Gráfica 18. Evolución de la Energía Normalizada respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.



Para la representación de la gráfica anterior referente a la energía normalizada es necesario tener como valores ya calculados la energía disipada, para después poder aplicar la formula (25). La cual nos arrojará los resultados que tendremos que graficar vs su respectivo número de ciclo de aplicación de carga.

$$\frac{\Sigma W_d}{W_d} = \frac{\text{Sumatoria } W_d}{W_d} \quad (25)$$

Donde:

$\Sigma W_d / W_d$ = Energía Normalizada.

W_d = Energía Disipada.

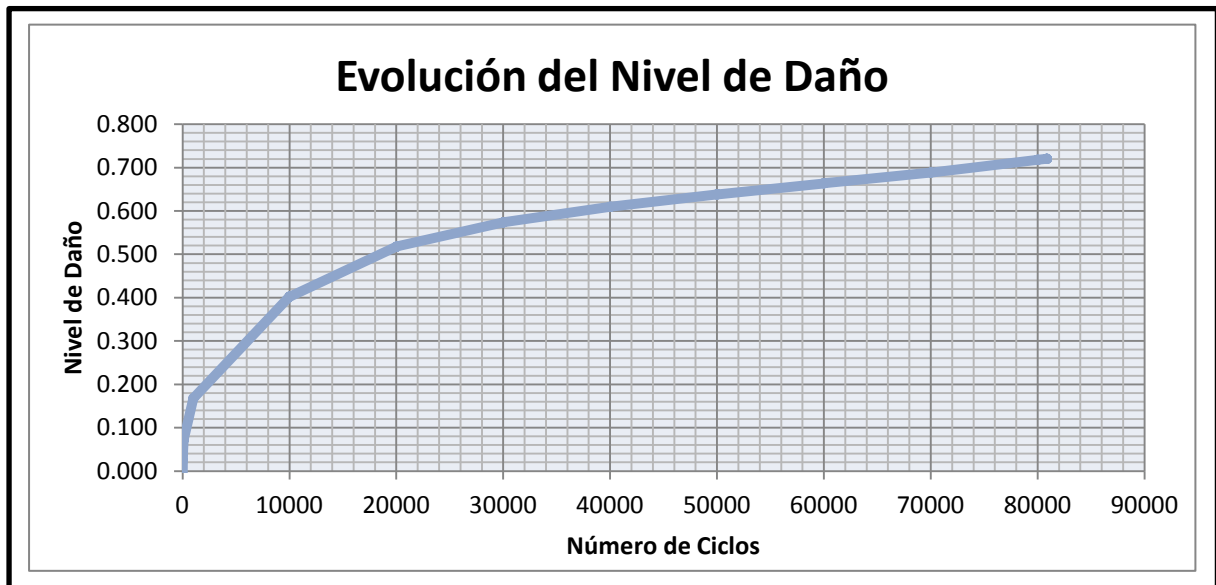
ΣW_d = Sumatoria acumulada de la Energía disipada.

Esta fórmula se puede expresar como la división de la sumatoria de la energía disipada (Recuadro Naranja) y su respectivo valor de energía disipada (Recuadro Verde), dándonos como resultado (Recuadro Guinda).

Tabla 15. Cuadro de datos para obtener el Valor de la Energía Normalizada.

W_d (J/m ³)	W_d (redondeo)	ΣW_d	$\Sigma W_d / W_d$ (redondeo)
22.3	22	22	1
25.3	25	47	2
24.2	24	71	3
24.5	25	96	4
26.3	26	122	5
26.2	26	148	6
26.2	26	174	7
25.5	25	199	8
25.6	26	225	9
27.4	27	252	9
27.7	28	280	10

Gráfica 19. Evolución del Nivel de Daño que presentó la viga respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.



Para realizar la gráfica anterior nos tenemos que referir al Capítulo 5, en el apartado de Enfoques en Términos de Daño, en donde se explica de forma detallada como calcular el Nivel de daño, el cual graficamos vs su respectivo número de ciclos de carga aplicada.

ANEXOS

ANEXO 1

MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA FALLA POR FATIGA DEL CONCRETO ASFÁLTICO COMPACTADO SOMETIDO A FLEXIÓN REPETIDA. ASTM D7460-08

Esta norma ha sido publicada bajo la designación fija D 7460, el número inmediatamente siguiente a la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última aprobación. Épsilon en superíndice (ϵ) indica un cambio editorial desde la última revisión o aprobación.

1. Alcance

1.1 Este método de ensayo proporciona los procedimientos para la determinación de un punto de falla único para la estimación de la vida a fatiga de 380 mm (14,96 pulgadas) de largo por 50 mm (1,96 pulgadas) de espesor, por 63 mm (2,48 pulgadas) de ancho, de las muestras de vigas de concreto asfáltico aserrados y compactados en laboratorio o campo, que son sometidos a flexión repetida.

1.2 La reproducibilidad entre laboratorios del método de ensayo se está determinando y estará disponible en o antes de junio de 2013. Por lo tanto, este método de ensayo no debe ser utilizado para la aceptación o rechazo de un material para que cumpla los propósitos.

1.3 La prueba de esta norma cita notas y notas al pie las cuales proporcionarán material explicativo. Estas notas y notas al pie de página (excluyendo aquellas en tablas y figuras) no deben ser consideradas como requisitos de la norma.

1.4 Esta norma no pretende dirigir todas las inquietudes sobre seguridad, si las hay, asociadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de la norma establecer la seguridad apropiada y prácticas de salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias.

2. Documentos de referencia

2.1 ASTM Estándar:

D 75 Práctica para el muestreo de los agregados.

D 140 Práctica para el muestreo de materiales bituminosos.

D 979 Práctica para el muestreo de mezclas bituminosas de pavimentación.

D 2041 Método de prueba para la gravedad específica máxima teórica y la densidad de las mezclas bituminosas de pavimentación.

D 3203 Método de prueba para determinar el porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas densas y de pavimentación.

D 3549 Método de prueba para espesores o alturas en el compactación de muestras de mezclas bituminosas de pavimentación.

D 3666 Especificación para los requisitos mínimos de los organismos de las pruebas y la inspección de carreteras y materiales de pavimentación.

D 5361 Práctica para el muestreo de mezclas bituminosas compactadas para las pruebas de laboratorio.

E 29 Prácticas para utilizar dígitos significativos en los datos de prueba para determinar la conformidad con las especificaciones.

2.2 ASSHTO estándar.

T321 Ensayo del método estándar para determinar la resistencia a la fatiga de una mezcla de asfalto compactada en caliente (HMA) sometida a la flexión repetida.

PP 3 Preparación de la muestra de mezcla asfáltica en caliente (HMA) por medio del compactador giratorio.

R 30 Práctica estándar para el acondicionamiento de mezcla de asfalto en caliente (HMA).

3. Terminología

3.1 Definiciones:

3.1.1 Módulo de viga – Rigidez a la flexión de la viga, tal como se determina en 10.1.3.

3.1.2 Punto de falla- Número de ciclos hasta la falla, N_f , que corresponde a la máxima o pico del Módulo normalizado \times Ciclos cuando se representa frente al número de ciclos.

3.1.3 Módulo inicial de viga. - la rigidez a la flexión de la viga es determinado en aproximadamente 50 ciclos de carga.

3.1.4 Módulo Normalizado x ciclos.

$$\frac{\text{Rigidez x Número de ciclos}}{\text{Módulo inicial x Ciclo del Módulo Inicial}} \quad (3)$$

4. Resumen del método de ensayo

4.1 El método de ensayo de flexión a cuatro puntos se lleva a cabo sobre muestras de vigas compactadas para evaluar las propiedades de fatiga de una mezcla de concreto asfáltico. Un ciclo Haversine (onda sinusoidal desplazada con completa amplitud en el lado de tensión cero) de desplazamiento se aplica al tercio central del Marco-H de un espécimen de viga, mientras que los puntos de un tercio exteriores se mantienen en una posición articulada fija. El índice de frecuencia varía entre 5 y 10 Hz. Esto produce un momento flector constante sobre el tercio central ($L / 3$) período (118.5 y 119 mm (4.66 a 4.69 in.)) entre los puntos de contacto del Marco-H sobre la muestra de viga. El nivel de tensión deseado está pre-calculado y una entrada para el control de desplazamiento. La desviación en la posición de media longitud ($L / 2$) de una muestra de viga es regulado por el sistema de control de circuito cerrado.

5. Significado y uso

5.1 El laboratorio determina la vida de fatiga por esta norma, los especímenes de viga se han utilizado para estimar la vida de fatiga en capas de pavimento de concreto asfáltico bajo la carga de tráfico repetido. Aunque el rendimiento en el campo de concreto asfáltico se ve afectado por muchos factores tales como (variación de tráfico, la velocidad y el envejecimiento, etc.), se ha previsto con mayor precisión cuando las propiedades de laboratorio son conocidas junto con una estimación del nivel de tensión inducida en la profundidad de la capa por las ruedas del tráfico de carga cuando se desplaza sobre el pavimento.

Nota 1: La calidad de los resultados producidos por esta norma depende de la competencia del personal que realice el procedimiento y la capacidad, calibración y mantenimiento del equipamiento utilizado. Organismos que cumplan los criterios de especificación D 3666, son generalmente considerados capaces de probar competentemente el objetivo / muestreo / inspección / etc. A usuarios de la norma se les advierte que el cumplimiento solo de la especificación D 3666 no asegura completamente resultados confiables. Los resultados fiables dependen de muchos factores; siguiendo las

sugerencias de la especificación D 3666 o alguna pauta aceptable similar, proporciona un medio de evaluación y control de algunos de estos factores.

6. Aparato

6.1 Prueba del sistema- El sistema de ensayo constará de un bastidor de carga, una cámara ambiental (sistema de control de temperatura), un control de circuito cerrado y un sistema de adquisición de datos. El sistema de ensayo debe cumplir los requisitos mínimos especificados en la tabla 16. Este estándar describe específicamente el sistema de dos proveedores primarios (Cox y Sons, Inc. (Cox) y controles de procesos industriales, Ltd. (IPC)), sin embargo, equipamiento similar también podría utilizarse.

6.1.1 Carga del dispositivo- El sistema de ensayo debe incluir un circuito cerrado, componente del ordenador de carga controlada que, durante cada ciclo de carga en respuesta a los comandos del procesamiento de datos y el componente de control, se ajusta y se aplica una carga de tal manera que la muestra experimenta un nivel constante de desplazamiento (y que resulta la tensión) durante cada ciclo de carga.

Tabla 16. Prueba de los requisitos mínimos del sistema

Carga de medición y control	Rango: 0 a 5 kN (0 a 1124 lbf) Resolución: 2.5 N (0.56 lbf) Precisión 5 N (1 lbf)
Desplazamiento de medición y control	Rango: 0 a 5 mm (0 a 0.2 in.) Resolución: 2.5 μ m (9.8x10 ⁵ in.) Precisión 5 μ m (2.0x10 ⁴ in.)
Frecuencia de medición y control	Rango: 5 a 10 Hz. Resolución: 0.005 Hz. Precisión 0.01 Hz.
Temperatura de medición y control	Resolución:±. 0.25°C (±. 0.45°F) Precisión:±. 0.5°C (±. 0.9°F)
Sensor de desplazamiento	transductor diferencial variable lineal (LVDT), extensómetro, o un dispositivo similar

El dispositivo de carga debe ser capaz de (1) proporcionar un ciclo Haversine (= sen^2 (grados / 2) de carga en un rango de frecuencia de 5 a 10 Hz. (2) someter las muestras a flexión de 4 puntos con rotación libre y traslación horizontal en toda la carga y puntos de reacción y (3) forzando la muestra de nuevo a su posición original (es decir, desviación cero) al final de cada ciclo de carga. La Figura 62, ilustra la forma de la onda Haversine. Las Figs. 63 y 64, muestran el momento en que se cargan los dispositivos Cox e IPC, respectivamente. Las cargas Cox en una dirección hacia abajo y de la IPC en una dirección hacia arriba, la primera versión del dispositivo IPC no tiene traducción libre de las abrazaderas interiores, sin embargo, el nuevo modelo permite la rotación libre y traslación en todas las cuatro abrazaderas.

6.1.2 Cámara Ambiental (sistema de control de temperatura)- La cámara ambiental deberá rodear toda la muestra y mantener la muestra a la temperatura de ensayo deseada. La temperatura debe estar dentro de ± 0.5 °C (± 0.9 ° F), durante todo el tiempo de prueba. Una cámara de medio ambiente no es necesaria, si la temperatura del ambiente circundante puede mantenerse dentro de los límites especificados.

6.1.3 Sistema de control y adquisición de datos- Durante cada ciclo de carga del sistema de adquisición de datos de control, deberán ser capaces de medir el desplazamiento de la viga, y el ajuste de la carga aplicada por el dispositivo de carga, de tal manera que, la muestra experimente un nivel constante de desplazamiento en cada ciclo de carga. Además, deberá ser capaz de registrar los ciclos de carga, cargas aplicadas, desplazamientos de la viga, temperatura, mientras que el cálculo y registro del esfuerzo tensión máxima, tensión de tracción máxima, ángulo de fase, y la rigidez a intervalos de ciclo de carga son especificadas por el usuario.

6.2 Aparatos y materiales diversos- Para el dispositivo Cox, se requiere una pieza de aluminio, en forma de cuña para la conexión del sensor de desplazamiento para el eje neutro de la muestra y cianoacrilato (pegamento) o equivalente que se necesita para fijar el objeto en la muestra. Tanto el equipo Cox y el equipo de IPC se requiere de una viga de aluminio sólido y un accesorio de alineación para el ajuste del espaciado adecuado de la abrazadera y una sierra para el corte de las caras paralelas con la tolerancia adecuada.

7. Peligros

7.1 Observar las precauciones de seguridad de laboratorio en la preparación y análisis de muestras de concreto asfáltico.

8. Toma de muestras y preparación de las muestras de ensayo

8.1 Laboratorio de mezclado y compactado de muestras- Muestra de carpeta asfáltica de acuerdo con la norma D 140 y una muestra global de acuerdo con la norma D 75. Si se desea una curva de fatiga completa, preparar nueve muestras replicadas de vigas de concreto asfáltico, compactadas desde la plancha (s) o viga (s) de acuerdo con AASHTO PP3. De lo contrario, preparar las muestras que se deseen para los resultados individuales de las vigas de prueba. Las mezclas de laboratorio son preparadas típicamente, acondicionando con un proceso a corto plazo el envejecimiento, tal como se define en AASHTO R 30. Probar al menos seis vigas replicadas de concreto asfáltico a diferentes niveles de tensión con el fin de desarrollar una curva de fatiga, como se muestra en la Figura. 65. Los especímenes adicionales también se pueden ensayar como se desee, si los datos parecen incluir un valor atípico, o si la falla de viga se produce directamente en una abrazadera. Una relación lineal en un gráfico log-log existe entre N_f y el nivel de esfuerzo ($\mu\epsilon$, micro deformación = tensión $\times 10^6$).

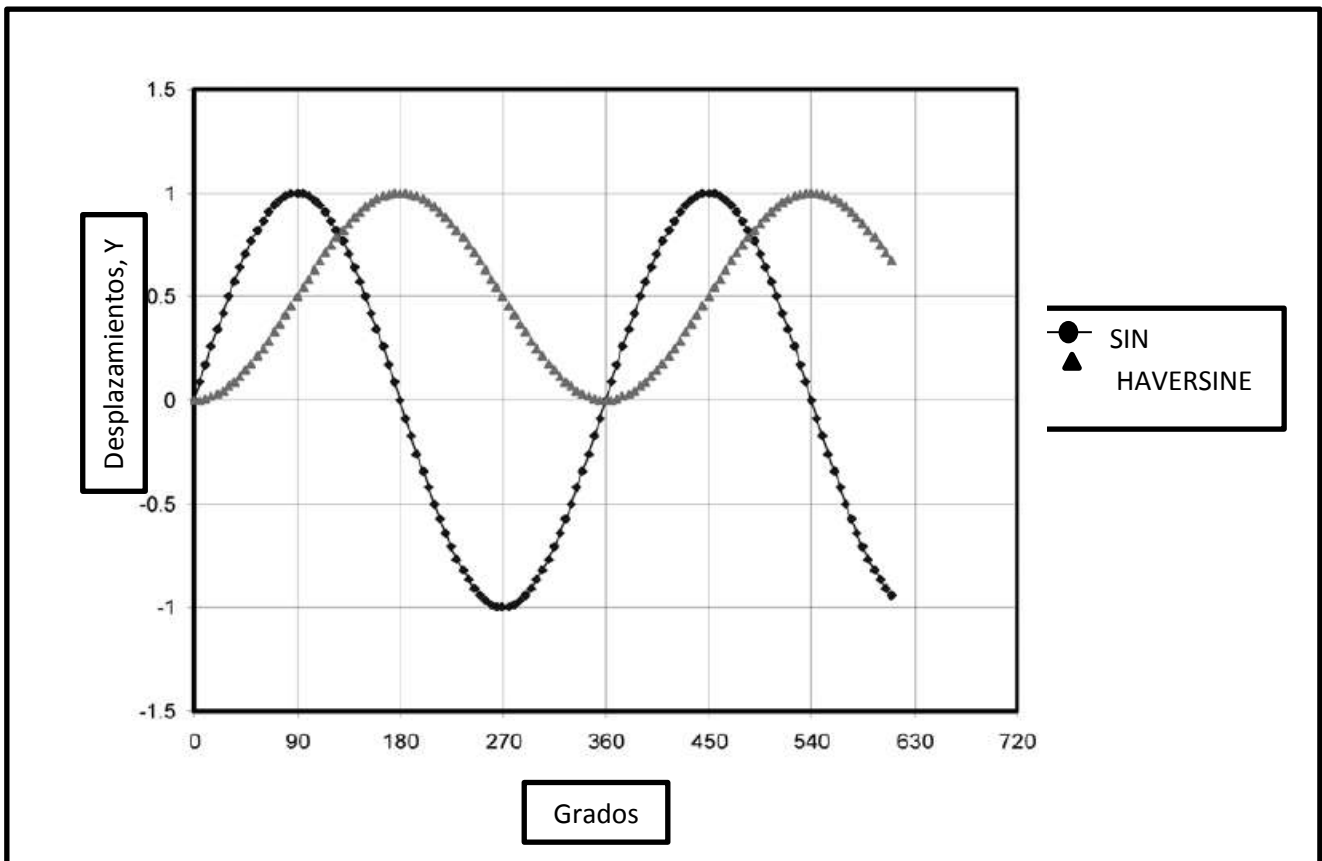


Figura 62. Ilustración de la forma de onda Haversine en relación con onda sinusoidal.

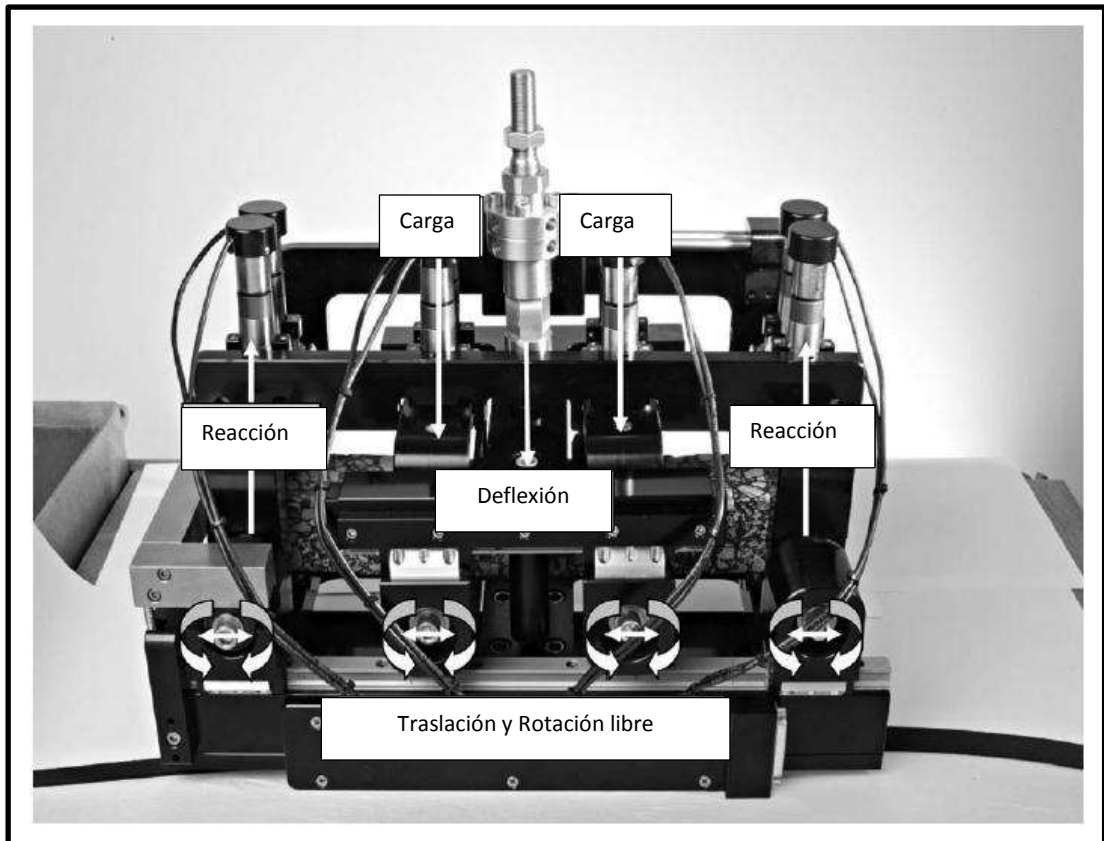
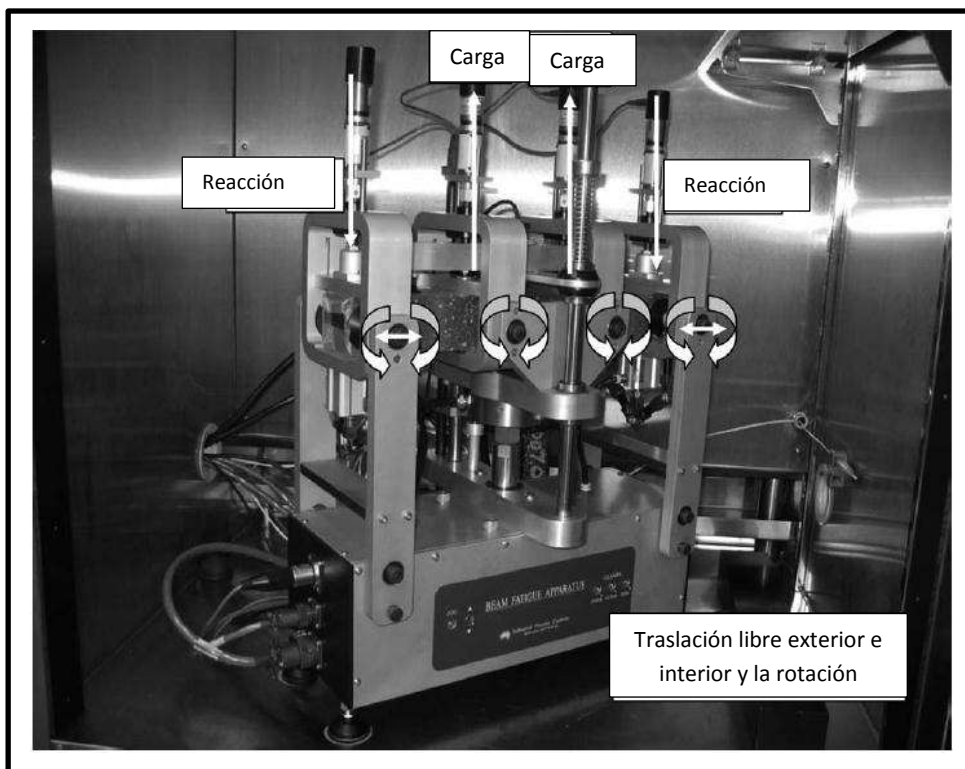
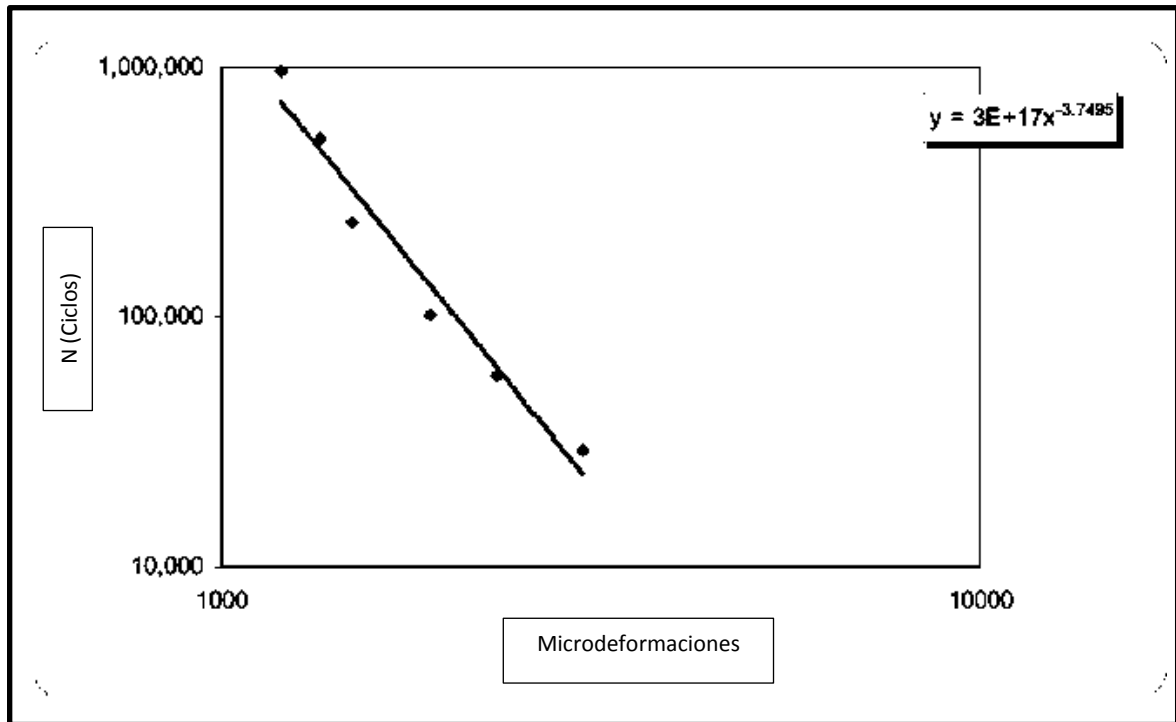


Figura 63. Características de carga y libertad del aparato de ensayo de fatiga (Cox)



Nota- primer modelo mostrado, el nuevo modelo permite la libre rotación y traslación en las cuatro abrazaderas.

Figura 64. Características de carga y libertad del aparato de ensayo IPC de fatiga.



Nota- Los niveles de tensión se deben ajustar para cada material.

Figura 65. Ejemplo de la curva de Fatiga

Nota 2: El tipo de dispositivo de compactación (amasado lineal, de rueda, vibración) pueden influir en los resultados de la prueba, con relación a la representación de la construcción real.

Nota 3: Normalmente las muestras de prueba se compactaron usando un esfuerzo de compactación estándar. Sin embargo, el esfuerzo de compactación estándar no puede reproducir los vacíos de aire de especímenes viales medidos según el método de prueba D 3203. Si las muestras son para ser compactadas a un determinado contenido de vacío de aire, el esfuerzo de compactación se debe determinar experimentalmente.

8.2 Planta mixta, laboratorio de las muestras compactadas. Obtuvieron muestras de concreto asfáltico de acuerdo con la norma D 979. Si se desea una curva de fatiga completa, preparar nueve muestras replicadas de vigas de concreto asfáltico, desde la plancha (s) o viga (s) compactadas de acuerdo con AASHTO PP 3. De lo contrario, preparar las muestras que se deseen para los resultados individuales de las vigas de prueba. Véanse las notas 2 y 3. Probar al menos seis especímenes de vigas replicadas de concreto asfáltico en diferentes niveles de deformación con el fin de desarrollar una curva de fatiga, como se muestra en la Figura 65. Los especímenes adicionales también se pueden ensayar como se desee, si los datos parecen incluir un valor atípico, o si la falla de viga se produce directamente en una abrazadera.

8.3 Las muestras de carretera- Obtener muestras compactadas de concreto asfáltico de la carretera, de acuerdo con la norma D 5361.

8.4 Recorte de la muestra- Aserrar al menos 6 mm de todos los lados de cada muestra compactada para proporcionar cortes uniformes y paralelos (corte de sierra) para las superficies de montaje de los calibradores de medición. Las dimensiones finales requeridas de la muestra de ensayo, después del aserrado son 380 ± 6 mm (14.96 ± 0.24 in.) de longitud, 50 ± 2 mm (1.96 ± 0.08 in.) en la altura, y 63 ± 2 mm (2.48 ± 0.08 in.) de ancho. Para minimizar la variabilidad de la muestra, se recomienda que las vigas deban ser inmediatamente etiquetadas para garantizar una orientación consistente (parte superior y los lados) durante la prueba, en relación con el proceso de compactación.

8.5 Almacenamiento de muestras- Las muestras deberán almacenarse en una placa de acero de 12.7 mm ($1/2$ in.), con una rugosidad de 0.127 mm (0.005 in.), en toda la superficie de la placa de extremo a extremo. La superficie plana mantiene los especímenes de viga a pretensión antes de la prueba. Limitando los especímenes a apilar más de dos en los bastidores de almacenamiento.

9. Procedimiento

9.1 Accesorio de alineación- Una viga de aluminio sólido, que tiene las dimensiones especificadas en 8.4 con tolerancias a una rugosidad de 0.051 mm (0.002 in.), en toda la longitud de la viga de aluminio (mediciones utilizando bordes rectos o un soldeo con galgas), se utiliza para asegurar la alineación apropiada de la viga accesorio antes de la prueba.

Inserte la viga de aluminio en el aparato, apriete las abrazaderas laterales en el marco exterior en primer lugar. Fijar los sujetadores superiores de los bastidores exteriores seguido de las abrazaderas superiores en los marcos interiores. Colocar el actuador en el control de carga y eliminar la carga. Compruebe que las abrazaderas estén completamente colocadas en la viga de aluminio. En el marco Cox, se aplican las abrazaderas laterales de los marcos interiores. Después vuelva al control de desplazamiento, ajuste la carga al lado positivo de cero, anote la ubicación del sensor actuador de desplazamiento y la posición inicial del ciclo. Una vez que esta posición de carga cero se encuentran, se utiliza como una guía, la parte inferior de todas las abrazaderas se alinearán. Si el lado superior e inferior de la muestra de ensayo de la viga no es paralelo, no debería ser un problema con la sujeción. El corte de la sierra es típicamente recto en todos los lados de la viga, incluso si estos no son paralelos entre sí;

las abrazaderas superiores compensan la falta de paralelismo, ya que las abrazaderas son independientes entre sí. El equipo fijo Cox está diseñado para utilizar un acoplador de barra de tracción de 3.175 mm (1/8 in.) para facilitar el movimiento de 360 grados, sin crear un momento excéntrico, tal como se muestra en la Figura 66. Las dos barras de tracción 3.175 mm (1/8 in.) sufren un desgaste y se representan en la Figura 66 de lado derecho. Se muestra la deformación que puede producirse debido a años de ensayos de fatiga; cualquier acortamiento del eje cambia la ubicación del impacto. Si el aparato utiliza este tipo de acoplador, esta ubicación inicial del sensor debe comprobarse después de cada siete días de ensayo y evaluar el estado del acoplador. Si el acoplador del aparato está duro, como con el dispositivo de IPC, esta comprobación de la alineación puede realizarse con menos frecuencia.

9.2 Medición de muestras- Medir la altura y el ancho de la muestra con una precisión de 0.01 mm (3.94×10^{-4} in.) En tres o más puntos diferentes a lo largo de la media de 100 mm (3.94 pulgadas) de la longitud de la muestra de acuerdo con las secciones aplicables según el método D 3549, determine el promedio de las mediciones para cada medición y registre los promedios con una precisión de 0.1 mm (0.004 in).

9.3 Fijar el objetivo para el eje neutro de la muestra (requerido con el aparato Cox)- Localizar el centro de la muestra en uno de sus 50 mm (1.97 in.) de alto en lados longitudinales (es decir, la mitad de la altura de la viga). Aplicar cianoacrilato (Pegamento) o equivalente en un círculo alrededor de este punto y colocar el objeto en el pegamento de tal manera que la parte superior del objeto se encuentra en el punto central de la viga. Deje que el pegamento se seque antes de mover la muestra. La figura 67, ilustra el objeto unido al eje neutro de la muestra.

9.4 Colocar la muestra en una superficie rígida plana a temperatura ambiente, manteniendo la temperatura de ensayo deseada durante dos horas para asegurar que la muestra se ha equilibrado a la temperatura de ensayo deseada antes de comenzar la prueba. Basados en experiencias pasadas, aproximadamente de 1.5 a 2 horas es suficiente para equilibrar la temperatura de la viga que se almacenó a temperatura ambiente para su entorno de prueba. La temperatura debe estar dentro de ± 0.5 °C (± 0.9 °F) durante todo el tiempo de prueba.

Nota 4- La temperatura común utilizada para este método de ensayo es 20° C (68 °F), ya que se encuentra cerca del nivel de temperatura crítica para la mayoría de los Estados Unidos (U.S.A.).

Otro método que se ha utilizado para determinar la temperatura de ensayo efectiva por los daños equivalentes de fatiga es el pavimento siguiendo la ecuación desarrollada durante el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP):

$$T_{\text{eff.Fatiga}}=0.8 (\text{MAPT})-2.7 \quad (4)$$

Donde:

MAPT = Temperatura media anual de pavimento (°C)

MAPT = $T_{20\text{mm}} = T_{\text{aire}} - 0.00618 (\text{lat}^2) + 0.2289 (\text{lat}) + 42.2 (0.9545) - 17.78$,

$T_{20\text{mm}}$ = Temperatura a 20 mm de profundidad desde la superficie del pavimento (°C)

T_{aire} = Temperatura media anual del aire (°C), y

Latitud = Latitud de ubicación del proyecto (grados).

9.5 Abra las abrazaderas y deslice la pieza en su posición (Figuras 68-71). Con el aparato Cox y el equipo de IPC, utilizar el accesorio de alineación para asegurar la separación adecuada horizontal de las abrazaderas, (Cox: 119 mm (4.69 in.); IPC: 118.5 mm (4.66 in.)) de centro a centro. Cuando la muestra y las abrazaderas se encuentran en la posición adecuada, sujetar las abrazaderas a los marcos exteriores, a continuación, aplicar los sujetadores superiores a los marcos exteriores. A continuación, aplique las pinzas superiores a los marcos interiores. Con el aparato Cox, se aplican las abrazaderas laterales de los marcos interiores. Compruebe la presión de apriete adecuado al alternar (ligera agitación) cada marco con el dispositivo de separación en su lugar y asegúrese de que todas las abrazaderas estén correctamente colocadas y de forma plana contra la muestra.



Figura 66. Acoplador de la barra de tensión, conectar el accionador a la estructura en H (abrazaderas interiores).

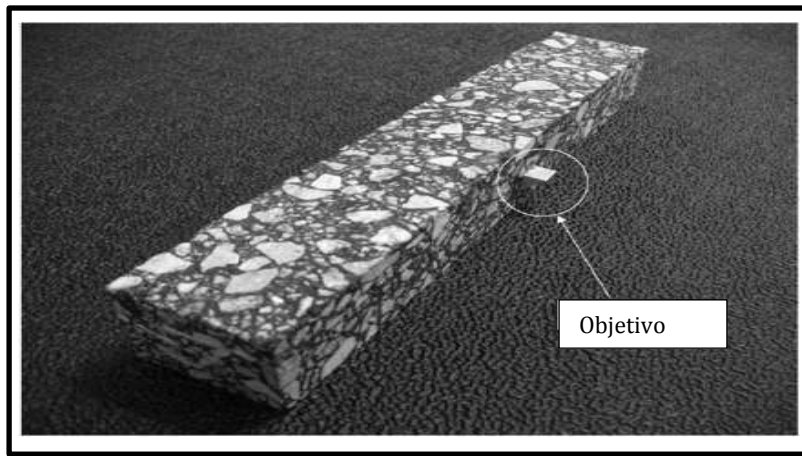


Figura 67. Objetivo fijado al eje neutral de la viga (media altura, media longitud) (Cox).

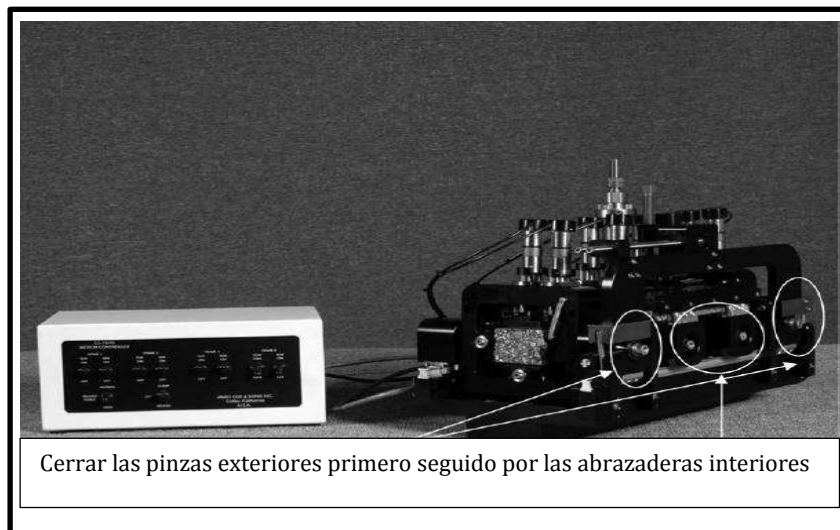


Figura 68. Orden del procedimiento de sujeción de la muestra.

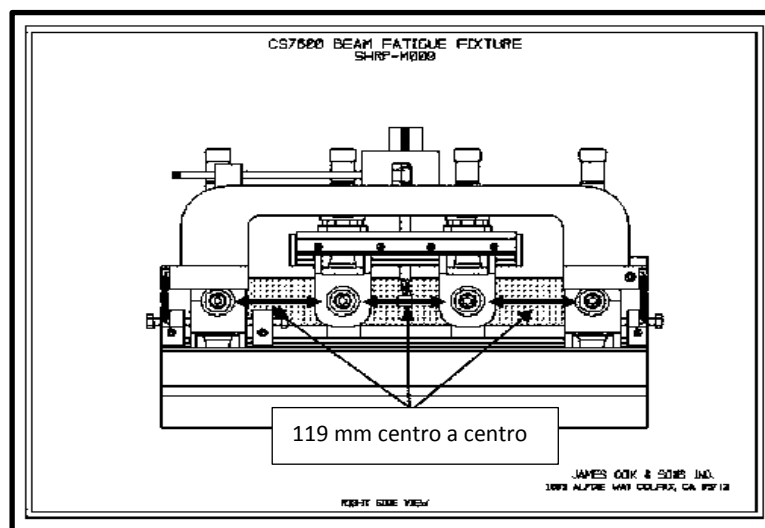


Figura 69. Esquema vista lateral del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga.

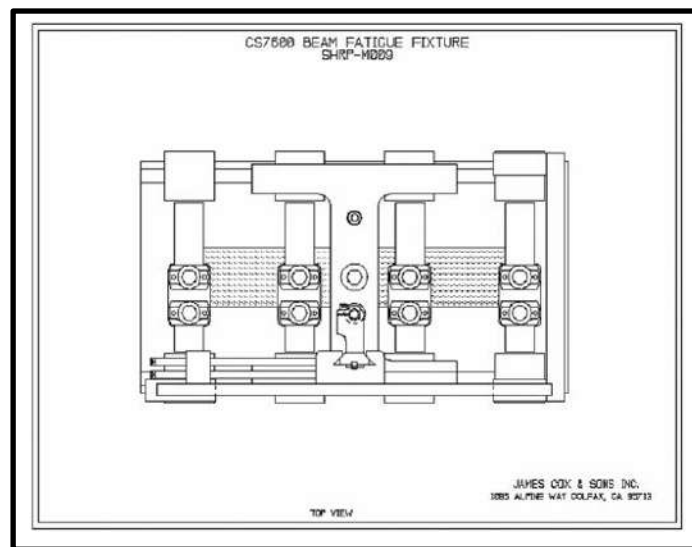


Figura 70. Esquema del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga, vista superior.

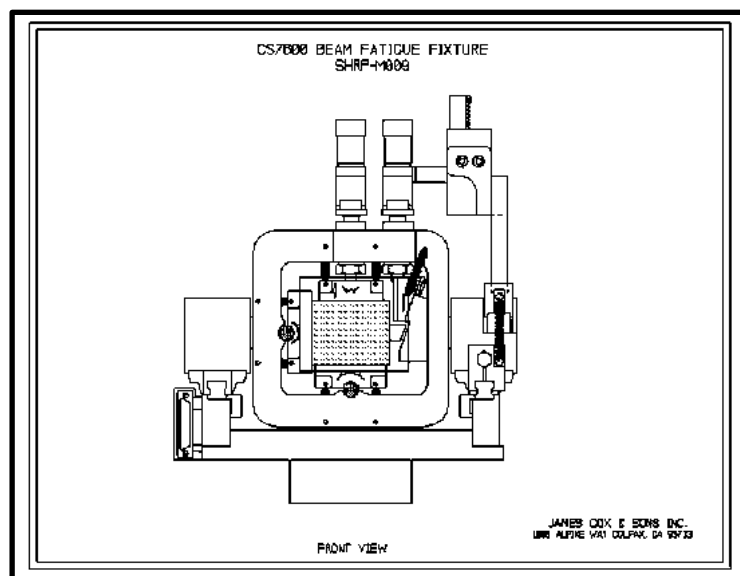


Figura 71. Esquema del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga, vista frontal.

9.6 Ajuste la amplitud de desplazamiento a la velocidad de deformación deseado ajustando manualmente el sensor y los parámetros en el software de control de prueba al tiempo que reduce el sensor de desplazamiento sobre la posición de la muestra en contacto adecuado. La figura 69 ilustra como el aparato o dispositivo Cox y el sensor de desplazamiento descansa en el objeto, de tal manera que el desplazamiento de la viga será medido en el eje neutro.

Con el aparato IPC (Figuras 72 y 73), el desplazamiento de la viga se mide en el lado de reacción a la tensión (parte superior) de la viga. Sujetar el sensor de desplazamiento en posición de modo que descansa en la parte superior de la superficie plana de la posición de contacto y verificar que el sensor de desplazamiento no se extenderá más de su longitud diseñada de movimiento.

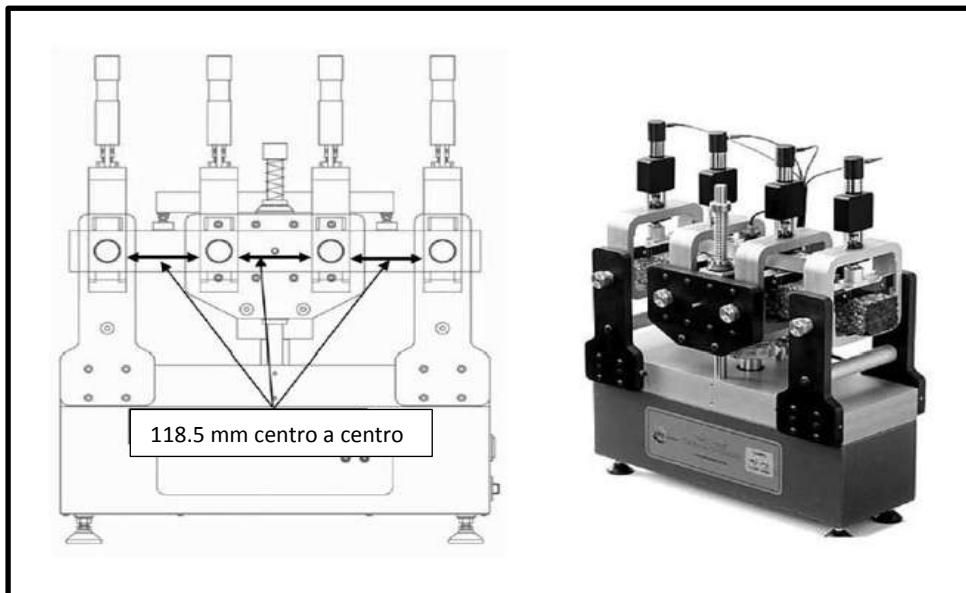


Figura 72. Esquema y foto del aparato IPC en el ensayo de viga a flexión de fatiga (nuevo modelo), vista lateral.

9.7 Seleccionar la tensión inicial deseada (50 a 300 $\mu\epsilon$; típicamente 200 a 800 $\mu\epsilon$ para concreto de asfalto convencional; 70 a 150 $\mu\epsilon$ para evaluar severamente la alta repetición pero a condición de tensión baja; 1500 a 3000 $\mu\epsilon$ para algunos materiales de tensión intermedia) la carga de frecuencia y los intervalos de ciclos de carga a los resultados del examen que se van a grabar y calcular. Los intervalos de ciclos de carga que deben medirse son típicamente hacia fuera para cubrir adecuadamente cada década en una escala logarítmica (es decir, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, y los ciclos de 1000) para toda la longitud esperada de la prueba. Incorporar estos valores en el modelo específico para este programa de pruebas en el sistema de adquisición de datos y de control. Típicamente, la frecuencia de carga se encuentra en un rango de 5 a 10 Hz. (10 Hz es la frecuencia más utilizada) para simular condiciones de carga repetida en carreteras.

Nota 5- La selección de intervalos de ciclo de carga en la que se calculan los resultados de pruebas y su registro puede estar limitado por la cantidad de memoria disponible para almacenar datos.

9.8 En los ciclos de carga que se registran incluyen un intervalo cerca de 50 ciclos. Determinar la rigidez de la muestra en el ciclo de carga número 50, esta rigidez es la estimación recomendada de la rigidez inicial de la viga.

9.9 Seleccionar un nivel de desplazamiento (nivel de tensión) cerca de la mitad del rango inicial para el material específico sobre la base de prueba y error o la experiencia, de tal manera que la muestra se someterá a un mínimo de 10000 ciclos de carga antes de la falla. Un mínimo de 1000 ciclos de carga garantiza que el espécimen no disminuye su rigidez demasiado rápido. Para establecer una curva de fatiga, ajustar la tensión hacia arriba y abajo en la viga réplica adicional para evaluar el comportamiento del material en un rango de niveles de tensión.

9.10 Después de seleccionar los parámetros de ensayo adecuados comenzar la prueba. Activar el sistema de adquisición de datos de control y de modo que los resultados de las pruebas en los intervalos de ciclos de carga seleccionados son controlados y registrados, asegurando que el sistema de ensayo está funcionando correctamente. Idealmente, el ensayo debe finalizar en algún momento después de que el valor de pico se ha logrado en una representación gráfica de los módulos complejos normalizados x ciclos contra ciclos, como se muestra en la figura 74. Para extender más allá de este punto de falla, se sugiere que la prueba se termine después de la rigidez a la flexión de la viga reduzca aproximadamente un 40 por ciento de la rigidez inicial de la viga. Con baja tensión de prueba, puede ser poco práctico para alcanzar este punto de falla deseado, en el caso, el punto de falla puede ser estimado usando el procedimiento de extrapolación como se describe en 10.1.7.

Nota 6- El punto de falla también puede ser evaluado continuamente por el monitoreo de control de la tensión cíclica contra gráficos de tensión en el alcance del punto de histéresis (gráficos continuos de tensión frente a la deformación durante la carga) se colapsa, pierde su forma, aparece horizontal, o combinaciones de los mismos.

10. Cálculo e interpretación de los resultados

10.1 Realizar los siguientes cálculos en los intervalos especificados por el operador del ciclo de carga:

10.1.1 tensión de tracción máxima (Pa):

$$\sigma_t = \frac{3 X a X P}{b X h^2} \quad (5)$$

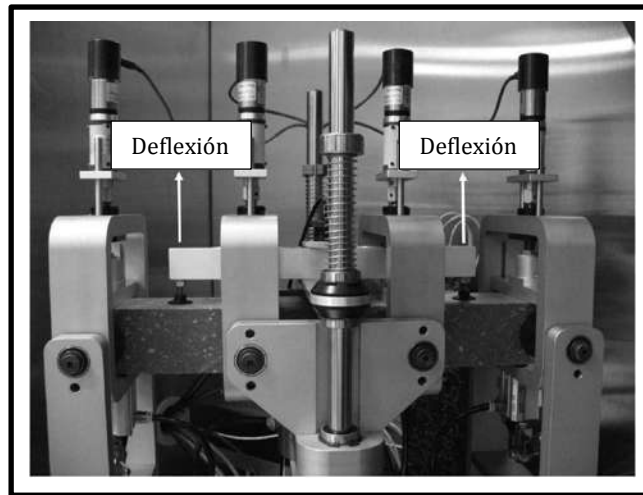


Figura 73. Desplazamiento en el aparato de IPC (se muestra los primeros modelos) se mide con un sensor situado en la parte superior de la muestra.

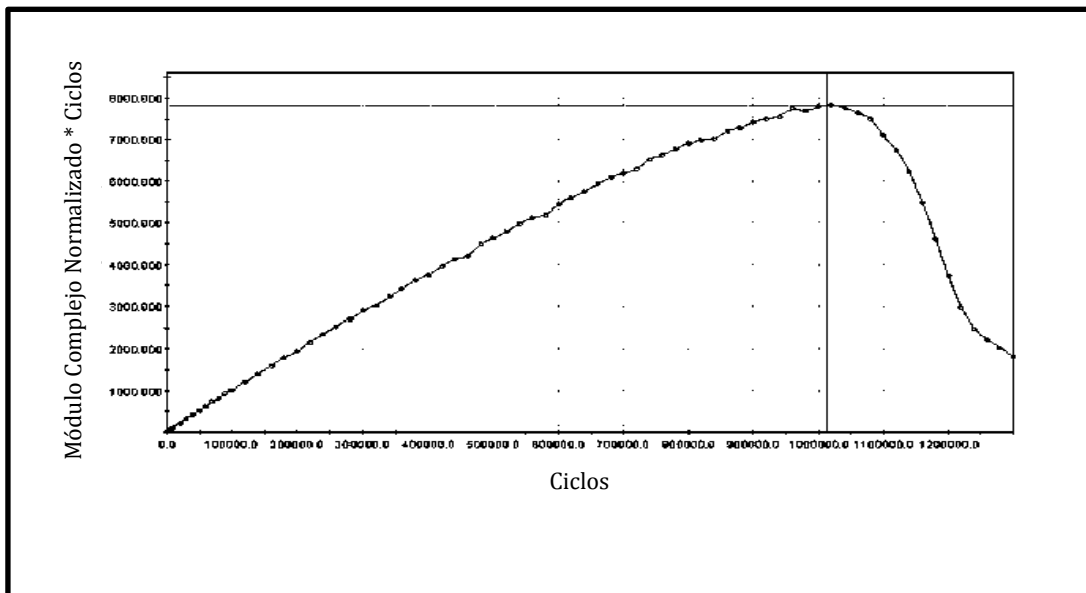


Figura 74. Módulo complejo normalizado x ciclos vs Ciclos

Donde:

a= espacio centro a centro entre abrazaderas (Cox: 0.1190 m; 0.1185 m),

P= Carga aplicada en el actuador (N),

b= promedio del ancho de las muestras (m) y

h= promedio de las alturas de las muestras (m).

10.1.2 Máxima tensión de tracción (m/m):

$$\epsilon_t = \frac{12 \times \delta \times h}{(3 \times L^2) - (4 \times a^2)} \quad (6)$$

Donde:

δ = máxima deflexión en el centro de la viga (m),

a = espacio entre abrazaderas interiores, $L/3$, (Cox: 0.1190 m; IPC: 0.1185 m); y

L = longitud de la viga entre las abrazaderas, (Cox: 0.3570 m; IPC: 0.3555 m).

10.1.3 Rigidez de la viga a la flexión (Pa):

$$S = \frac{\sigma t}{\epsilon t} \quad (7)$$

10.1.4 Ángulo de Fase (grados):

$$\Phi = 360 \times f \times s \quad (8)$$

Donde:

f = frecuencia de carga (Hz), y

s = Tiempo entre P_{\max} y δ_{\max} (s)

Nota 7- Cuando se utilicen software automáticos de prueba en el control y adquisición de datos, Φ es aproximadamente calculado dentro de un algoritmo por un software automatizado.

10.1.5 Módulo normalizado X ciclos (Pa/Pa)

$$NM = \frac{S_i \times N_i}{S_o \times N_o} \quad (9)$$

Donde:

NM= Módulo normalizado X ciclos,

S_i = Rigidez de la viga a flexión para un ciclo i (Pa),

N_i = Ciclo i ,

S_o = Rigidez inicial de la viga a la flexión (Pa), estimada para aproximadamente 50 ciclos, y

N_o = Número actual de ciclos donde la rigidez inicial de la viga es estimada.

10.1.6 Punto de falla (N_p Número de ciclos hasta la falla) - Se produce en el valor máximo o pico de Módulo Normalizado x Ciclos (Fig. 74) cuando se representa frente al número de ciclos (1-3). Una parte de los datos se muestra en la tabla 17, para mostrar cómo se procesan los datos de fatiga de la viga. El valor máximo aproximado se puede leer fácilmente a partir de los datos calculados en la tabla. Además, los números calculados de módulo normalizados también pueden estar en forma estadística a una curva polinomial de mejor ajuste, para más fácilmente seleccionar el pico de la curva y la determinación de N_f ; matemáticamente, el pico se encuentra en la curva diferencial de segundo orden cuando la ecuación es igual a cero. En este ejemplo, el punto de falla de la viga se determina que es aproximadamente 1, 000,000 ciclos.

10.1.7 Extrapolación de un punto de falla (basado en la función de una etapa Weibull) - Se utiliza para los resultados de la prueba de fatiga.

Tabla 17. Tabla de resultados.

Número de Ciclos	Módulo de viga (Ksi)	Módulo normalizado X ciclos	Ajuste de la curva del Módulo Normalizado X ciclos
49	412.73	1.00	1.00
59	407.27	1.19	1.19
69	403.93	1.38	1.38
79	400.86	1.57	1.56
89	398.86	1.76	1.72
99	397.13	1.94	1.94
199	377.02	3.71	3.71
299	365.21	5.40	5.40
399	355.95	7.02	7.04
-	-	-	-
639,999	179.15	5669.41	5739.15
659,999	180.16	5879.60	5939.54
679,999	178.50	6001.87	6083.25
699,999	177.61	6127.54	6197.14
719,999	177.89	6323.17	6282.33
739,999	176.89	6472.51	6525.92
759,999	174.40	6553.89	6626.00
779,999	173.77	6701.97	6777.35
799,999	172.62	6828.41	6904.06
819,999	170.03	6894.02	6982.29
839,999	169.63	7045.86	7009.76
859,999	167.49	7122.23	7211.63
879,999	165.77	7213.18	7279.26
899,999	164.84	7335.90	7413.91
919,999	163.25	7426.54	7503.34
939,999	160.63	7466.30	7559.20
959,999	161.29	7656.28	7750.53
979,999	158.85	7697.81	7684.28
999,999	155.35	7681.79	7796.08
1019,999	152.23	7677.64	7821.54
1,039,999	148.90	7657.07	7759.67
1059,999	142.75	7482.08	7642.30
1,079,999	137.59	7347.61	7491.58
1,099,999	129.99	7070.20	7102.10
1,199,999	117.63	6514.41	6736.92
1,139,999	105.11	5924.85	6232.63
1,159,999	89.61	5139.73	5787.98

Obtenido especialmente en los niveles bajos de tensión, donde el valor máximo o pico de los módulos normalizados x ciclos cuando se representa frente al número de ciclos supera la duración de la prueba. Este procedimiento, por Tsai, Harvey, y Monismith, utiliza la ecuación siguiente:

$$\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR})) = \gamma \times \text{Ln}(\text{N}) + \text{Ln}(\lambda) \quad (10)$$

Donde:

$\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR}))$ = El logaritmo natural del logaritmo natural negativo (SR),

SR = Relación de flexión y rigidez de la Viga, rigidez de la viga en el ciclo i / rigidez inicial del viga

N = Número de ciclos

γ = La pendiente de la regresión lineal (Figura 75) de el $\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR}))$ contra $\text{Ln}(\text{N})$, y

$\text{Ln}(\lambda)$ = La intersección de la regresión lineal de la $\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR}))$ contra $\text{Ln}(\text{N})$

10.1.7.1 El punto de falla se calcula resolviendo esta ecuación para el valor de N, donde SR es igual a 0.500 ($\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR})) = -0.3675$) o 50% de la rigidez inicial.

11. Reporte

11.1 Descripción de concreto asfáltico. Informar del tipo de asfalto, contenido de asfalto, tipo de agregado, y el porcentaje de vacíos de aire.

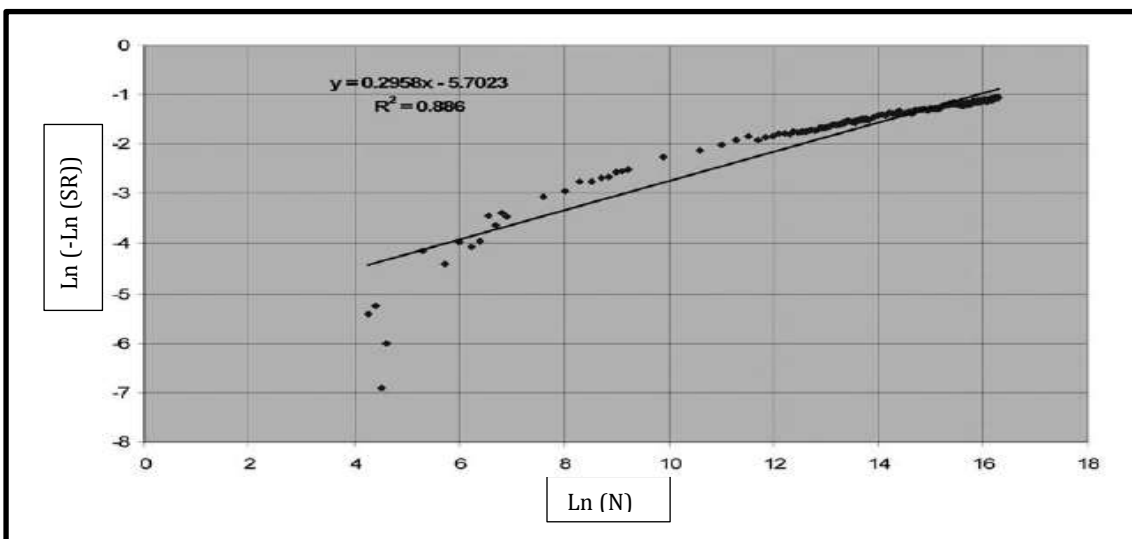


Figura 75. Ejemplo de la regresión lineal de $\text{Ln}(-\text{Ln}(\text{SR}))$ vs $\text{Ln}(\text{N})$.

11.2 Dimensiones de la Muestra. Informar el tamaño de la muestra, la altura de la muestra y el promedio del ancho de la muestra en metros, a cuatro dígitos significativos.

11.3 Reportar la temperatura media de prueba con una precisión de 0.2 °C (0.38 °F).

11.4 Reportar los resultados de ensayo siguientes para cada intervalo de ciclo de carga seleccionada por el operador a tres cifras significativas: Aplicación de carga (N), deflexión de la viga (m), tensión de tracción (m/m), la rigidez a la flexión (Mpa) y el módulo normalizado x Ciclos (Mpa).

11.5 Reportar la rigidez inicial a la flexión (Mpa).

11.6 Reportar la medida o estimación de ciclos a la falla.

11.7 Preparar un gráfico de normalización de módulo complejo x ciclos frente ciclos como se muestra en la figura 74.

12. Precisión y sesgo

12.1 Precisión- la repetitividad dentro del laboratorio de la desviación estándar en escala logarítmica ha sido determinada como 0.278, basado sobre pruebas de laboratorio, tres repeticiones de cada prueba en cada nivel de tensión (que van desde 200 a 2000 $\mu\epsilon$), y once tipos diferentes de las muestras de mezclas. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos realizados adecuadamente por el mismo operador en vigas muestra similares se replican en el mismo equipo en el mismo nivel de tensión no deben diferir en más de 0.787 en una escala logarítmica. La tabla 18 muestra un resumen de los datos utilizados para generar la desviación estándar dentro del laboratorio. Esta estimación de la precisión es una combinación de ambas réplicas la variabilidad de preparación de muestras y las pruebas de variabilidad. Entre laboratorios reproducen este método de prueba, se está determinando y estará disponible en o antes de junio de 2013. Por lo tanto, este método de ensayo no debe ser utilizado para la aceptación o rechazo de un material para fines de compra.

12.2 Sesgo- Ninguna información puede ser presentada en este método de sesgo para medir la resistencia a la fatiga porque este es un ensayo destructivo y ningún material que tenga un valor de referencia aceptado se encuentra disponible.

13. Palabras claves.

13.1 Fatiga del concreto asfáltico; rigidez del concreto asfáltico; prueba de la tensión del concreto asfáltico; vida a la fatiga; flexión.

Tabla 18. Fatiga del concreto asfáltico.

Mezcla de concreto asfáltico ID	Tensión controlada (micro)	Número de ciclos a la falla	Desviación estándar de los números de ciclo a la falla	Log de número de ciclos a la falla	Desviación estándar del Log del número de ciclos a la falla
1	300	85790		4.933	
	300	165560		5.219	
2	300	54682	57191	4.738	0.242
	300	39392		4.595	
	300	197160		5.295	
	300	241360	106172	5.383	0.431
3	200	805800		5.906	
	200	1190120		6.076	
	200	408320	390918	5.611	0.235
	300	192480		5.284	
	300	24278		4.385	
	300	48176	91001	4.683	0.458
4	200	966160		5.985	
	200	1105600		6.044	
	200	306759	426693	5.487	0.306
	300	75670		4.879	
	300	12290		4.090	
	300	43752	31690	4.641	0.405
5	200	287000		5.458	
	200	456200		5.659	
	200	179833	139339	5.255	0.202
	800	21310		4.329	
	800	8780		3.943	
	800	20674	7058	4.315	0.219
6	400	250960		5.400	
	400	36656		4.654	
	400	105440	109418	5.023	0.418
	350	222920		5.620	
7	350	555240		5.468	
	350	582440	200180	5.746	0.139
	2000	417039		5.620	
8	2000	294039		5.468	
	2000	556799	131469	5.746	0.139
	2000	437999		5.641	
9	2000	218839		5.340	
	2000	181479	138582	5.259	0.202
	2000	482559		5.684	
10	2000	487719		5.688	
	2000	281600	117542	5.450	0.136
	2000	186439		5.271	
11	2000	32737		4.515	
	2000	52479	83625	4.720	0.391
	2000	115359		5.062	
promedio	2000	210839		5.324	
	2000	112299	56030	5.050	0.155
			139127		0.278

CONCLUSIONES

Como se mencionó y se analizó en toda la investigación, concluyo que las mezclas asfálticas son susceptibles a diversas fallas, entre ellas y en esta investigación estudiada la fatiga, existe mucha importancia en un ensayo de fatiga debido a que es un parámetro que se toma para tener un buen diseño de pavimentos cuando el número de ejes equivalentes excede los 30 millones como se menciona en el protocolo AMAAC. Por lo cual la correcta determinación de este parámetro en un estudio de laboratorio nos proporcionara una estimación acertada de la vida útil del pavimento bajo este criterio de falla. Como mencioné en capítulos anteriores existen diversos criterios de evolución del módulo de rigidez, comprobé que el criterio clásico de fatiga es un criterio aceptable dentro de los tres criterios existentes para medir dicho ensayo. Una de las causas principales para poder decir que este es un criterio aceptable es porque su modo de obtención es bastante sencillo y confiable, además de que el equipo GCTS para fatiga con el que cuenta el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) donde realicé este ensayo sirve únicamente para desarrollar ensayos de modo de sollicitación en deformación controlada, debido a que el Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT) se encuentra en la parte inferior del apoyo de la viga, lo cual impide que se realicen ensayos en modo de sollicitación de fuerza ya que al sufrir la ruptura de la probeta está podría dañar el LVDT originando así valores erróneos.

Además de poder comprobar qué criterio es más viable utilizar para el análisis del ensayo, observé los resultados que arroja el equipo después de realizar la prueba. Para lo cual tuve que elaborar un espécimen y analizarlo en el equipo GCTS de análisis de fatiga en viga de 4 puntos, el espécimen fue realizado con materiales previamente analizados y estudiados, tal y como lo pide el protocolo AMAAC. Dichos materiales pétreos son provenientes del banco de material La Cañada, ubicado en el municipio de El Márquez en la Ciudad de Querétaro, Qro. Así como un cemento asfáltico convencional AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca, Gto. Las propiedades del cemento asfáltico, según el estudio reológico proporcionado, corresponden a un grado de desempeño de un PG 64-22. Mencionado lo anterior, procedí a realizar el espécimen de prueba, por lo cual me di cuenta de la importancia que se debe de tener al cumplir con todos los requisitos que pide la norma, para este caso la norma ASTM D7460-08 es la que nos rige en el ensayo de fatiga en viga de 4 puntos.

Al terminar de fabricar la viga de prueba se procedió a ensayarla en el equipo, lo cual nos sirvió para poder conocer y analizar los resultados parciales mientras la prueba estaba en proceso, además de los resultados finales. Se observó de manera detallada como

presentaba daños la viga de ensayo conforme iban avanzando los números de ciclos de carga en el espécimen. Durante el proceso de la prueba se analizaron gráficas y tablas de aplicación de carga, cabe mencionar que estos resultados parciales nos indican en primera instancia como se está comportando el espécimen ensayado, además de que podremos saber si la prueba se está desarrollando de manera correcta, originando al final de la misma que nuestros resultados sean correctos y confiables. Para nuestro caso los resultados parciales que presentó el espécimen en estudio fueron los esperados, en otras palabras conforme avanzaron los números de ciclos de carga el módulo de rigidez fue disminuyendo, concluyendo así que la prueba se realizaba de manera correcta en ese momento.

Tras el final de la prueba y los resultados obtenidos observé que el espécimen registro un total de números de ciclos mayor de 80 mil, cabe señalar que la prueba debió parar antes y por lo tanto registrar un menor número de ciclos de carga, ya que utilizamos el criterio clásico de fatiga como criterio de análisis, el cual nos dice que la prueba termina cuando se presenta el 50% del módulo de rigidez inicial, en esta ocasión se decidió llegar hasta un 30% para poder observar de manera más detallada cómo se comporta el espécimen tras los ciclos de carga, además cabe mencionar que la viga no presentó fractura aun dejándola transcurrir por todo ese tiempo. Procedí a descargar los resultados que origino el equipo y después de analizarlos, realicé las gráficas que presento en el capítulo 6, las cuales nos indican en términos generales que el ensayo se desarrolló de manera correcta según lo indica la norma de referencia, en otras palabras se podría decir que se originaron resultados confiables.

Por lo tanto se comprueba que este ensayo llegará a ser de gran ayuda para poder obtener un buen diseño de pavimentos, tomando como base que países de primer mundo como Europa y Estados Unidos utilizan este criterio de falla como método de diseño. Cabe mencionar que esta investigación ayudará a modificar y mejorar el protocolo AMAAC para diseño de mezclas asfálticas e impulsar el diseño de pavimentos en nuestro país bajo este método de diseño y así poder obtener pavimentos eficientes y de calidad. En el Instituto Mexicano del Transporte se trabaja para llegar a obtener la curva representativa de la fatiga en las mezclas asfálticas o dicho de otra forma la curva de Wöhler para mezclas asfálticas, además de los parámetros de modelos de agrietamiento por fatiga, que nos ayudaran a determinar el nivel de daño que producen las repeticiones de carga de vehículos con características específicas de nuestro país, teniendo estos parámetros podremos obtener el inverso del nivel de daño, dándonos como resultado el tiempo efectivo de nuestra carpeta asfáltica.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que a continuación se presentan son propuestas por el autor, tomando como referencia el trabajo realizado en la estancia de investigación en el Instituto Mexicano del Transporte. Para el caso específico del ensayo de fatiga en viga de 4 puntos se llegó a las siguientes recomendaciones, se analizaron y se comprobó que si no se llevan a cabo, los resultados dejan de ser confiables ya que la prueba sufre alteraciones.

- Tener una buena elección en el material pétreo, así como en la selección del cemento asfáltico tomando en cuenta la zona en donde se llevara a cabo la obra.
- Seguir las normas y/o recomendaciones AMAAC para cada ensayo según la categoría de agregados, asfaltos y mezclas asfálticas.
- Tener el equipo adecuado y el que se especifica en las normas de referencia y/o recomendaciones.
- Contar con equipos verificados y en buenas condiciones.
- Contar con personal capacitado y certificado.

Para la creación de los especímenes de prueba.

- Tener a la misma temperatura el material pétreo, el asfalto y los moldes donde se llevará a cabo la mezcla asfáltica.
- Tener previamente bien nivelado el compactador lineal.
- Mojar el interior del molde del espécimen con aceite para evitar que el agregado se quede adherido a este, así como papel en la parte inferior y superior del mismo.
- Compactar el espécimen de prueba dos veces para eliminar los vacíos.
- Dejar reposar el espécimen alrededor de 5-10 min antes de expulsarlo del molde para evitar que el material se disgregue por la temperatura que presenta la muestra.
- Dejar reposar por 24 hrs el espécimen para proceder a serrarlo.
- Acondicionar el espécimen a las medidas que indica la norma.

Para la realización del ensayo en el equipo de prueba.

- Calibrar el equipo anticipadamente mínimo 2 hrs antes de iniciar el ensayo.
- Acondicionar la cámara de temperatura con la temperatura de ensayo por lo menos 2 hrs antes de iniciar la prueba para que esta se quede constante.
- Acondicionar el espécimen a la temperatura de ensayo min 2 hrs antes de iniciar.
- Cambiar el modo del equipo a modo de fatiga.
- Colocar de manera uniforme el espécimen en el equipo de ensayo.
- Activar las abrazaderas para sujetar el espécimen al equipo.
- Atornillar de manera segura el equipo a la cámara de temperatura.
- Realizar correctamente la conexión del Transductor Diferencial

Variable Lineal (LVDT).

- Colocar la celda de carga y conectarla al equipo.
- Cerrar la cámara de temperatura.
- Iniciar el ensayo según lo indica la norma.

Por ningún motivo se deberá abrir la cámara de temperatura después de iniciada la prueba ya que al abrirla puede sufrir alteraciones por el cambio de temperatura lo que originará que el ensayo no presente la temperatura deseada y como consecuencia obtendremos resultados erróneos.

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Dependencia del Tiempo-Temperatura del Cemento Asfáltico.	6
Figura 2. Comportamiento Visco-Elástico del Cemento Asfáltico.	7
Figura 3. Estructura Pétreo de la Mezcla.	8
Figura 4. Comportamiento del Agregado a la Carga de Corte.	8
Figura 5. Comportamiento de los Agregados en Pilas de Acopio.	9
Figura 6. Agrietamiento por Baja Temperatura.	11
Figura 7. Progreso de la Fisuración por Fatiga.	12
Figura 8. Tensiones en la parte inferior de la carpeta asfáltica	13
Figura 9. Formación de roderas en la superficie de rodamiento. José Eduardo García Servín.	13
Figura 10. Deformación permanente debido a una capa subyacente débil.	15
Figura 11. Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil.	15
Figura 12. Comportamiento a) Elástico b) Viscoelástico c) Viscoso.	16
Figura 13. Comportamiento tipo de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, (ϵ) deformación – (N) Número de repeticiones de carga.	17
Figura 14. Aproximadamente el 95% de las carreteras del mundo son hechas de asfalto.	20
Figura 15. Criterios de selección de ensayos para la evaluación del diseño para mezclas asfálticas.	22
Figura. 16. Imagen del Viscosímetro Rotacional: José Eduardo García Servín.	29
Figura 17. Ensayo de Tensión Indirecta.	36
Figura 18. Rueda Cargada de Hamburgo.	37
Figura 19. Analizador de Pavimentos Asfálticos. José Eduardo García Servín.	38
Figura 20. Vista interior del APA. José Eduardo García Servín.	38

Figura 21. Imagen de la Pista Española.	39
Figura 22. Imagen de la cámara GCTS para Módulo Dinámico. José Eduardo García Servín.	39
Figura 23. Imagen del Equipo GCTS, Exterior (Izquierda) e Interior (Derecha) para el Ensayo de Fatiga Empleando la Viga de Flexión de 4 Puntos. José Eduardo García Servín.	41
Figura 24. Fotografía de August Wöhler	43
Figura 25. Distinción de las Tres Fases del Ensayo de Fatiga.	46
Figura 26. Imagen de la Máquina en el Ensayo de Tracción.	47
Figura. 27. Modelación del Transcurso del Ensayo de Tracción.	48
Figura 28. Ensayo de Prueba de Fatiga en el Concreto.	50
Figura 29. ASTM C78. Cargas en los puntos tercios. La mitad de la carga se aplica en cada tercio de la luz. El módulo de rotura es más bajo que en el caso de la carga en el punto medio. La tensión máxima en el tercio medio de la viga.	51
Figura 30. Carga en el punto medio. Toda la carga se aplica en el centro de la luz. El módulo de rotura será mayor que en caso de la carga en los puntos tercios. La tensión máxima solo en el centro de la viga.	52
Figura 31. Tipos de probetas sometidos a diferentes tipos de flexión.	53
Figura 32. Prensa Universal utilizada para ensayos de Compresión en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). José Eduardo García Servín.	55
Figura 33. Instrumentación utilizada en el Ensayo de Tensión Indirecta.	56
Figura 34. Esquema de la muestra de la prueba de tensión de flexión en los 2 puntos.	58
Figura 35. Aparato de prueba de flexión en 2 puntos (LCPC Nantes-Francia).	58
Figura 36. Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión en 3 puntos.	59
Figura 37. Asignación de la tensión en la muestra del ensayo de flexión 4 puntos.	60
Figura 38. Aparato de la prueba de flexión de cuatro puntos (DWW-Países Bajos).	60
Figura 39. Viga de prueba de flexión con el apoyo de BARKSDALE.	61

Figura 40. Esquema de la muestra y de la solicitación en la prueba de tracción directa.	62
Figura 41. Diagrama de la muestra y solicitación en el ensayo de tensión-compresión.	63
Figura 42. Ensayo de Tensión-Compresión (ENTPE-Francia).	63
Figura 43. Esquema de la prueba y de la solicitación en el ensayo triaxial.	64
Figura 44. Evolución de la respuesta de acuerdo al modo de solicitación. Modo fuerza (izquierda), modo desplazamiento (derecha).	65
Figura 45. Principio de obtención de la curva de Wöhler para el ensayo en control de fuerza.	67
Figura 46. Análisis de señales de ondas P (compresión) en mezclas asfálticas.	69
Figura 47. Definición de parámetros obtenidos en la curva de evolución del módulo en función del número de ciclos.	72
Figura 48. Definición de parámetros obtenidos en la curva de evolución de la energía disipada en función del número de ciclos.	72
Figura 49. Imagen del Equipo Utilizado en la Prueba de Módulo Dinámico y Fatiga. José Eduardo García Servín.	75
Figura 50. Compresor y Equipo de Cómputo donde se registra la Información de la Prueba. José Eduardo García Servín.	75
Figura 51. Imagen del Equipo Compactador Lineal y su Modo de Control. José Eduardo García Servín.	76
Figura 52. Vista Interior del Compactador Lineal. José Eduardo García Servín.	76
Figura 53. Imagen de la Viga y sus Dimensiones. José Eduardo García Servín.	76
Figura 54. Imagen de la Viga en la Sierra de Corte, con la cual se modifican las dimensiones hasta Contar con las que Indica la Norma. José Eduardo García Servín.	77
Figura 55. Imagen de las Vigas de prueba recién aserradas. José Eduardo García Servín.	77
Figura 56. Vista a detalle del Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT).	78
Figura 57. Imagen del equipo utilizado en el ensayo a la Fatiga con Viga de 4 Puntos. José Eduardo García Servín.	79

Figura 58. Colocación de la Viga en el equipo de Fatiga. José Eduardo García Servín.	79
Figura 59. Colocación Completa de la Viga en el Equipo GCTS de Fatiga. José Eduardo García Servín.	79
Figura 60. Imagen del Equipo de Prueba a la Fatiga en Viga de 4 Puntos dentro de la Cámara de Temperatura. José Eduardo García Servín.	80
Figura 61. Imagen de la Pantalla de Registro de Datos de la Prueba, en la cual se observa en la parte inferior izquierda la gráfica de Rigidez vs Número de Ciclos. José Eduardo García Servín.	81
Figura 62. Ilustración de la forma de onda Haversine en relación con onda sinusoidal.	94
Figura 63. Características de carga y libertad del aparato de ensayo de fatiga (Cox).	95
Figura 64. Características de carga y libertad del aparato de ensayo IPC de fatiga.	95
Figura 65. Ejemplo de la curva de Fatiga.	96
Figura 66. Acoplador de la barra de tensión, conectar el accionador a la estructura en H (abrazaderas interiores).	99
Figura 67. Objetivo fijado al eje neutral de la viga (media altura, media longitud).	100
Figura 68. Orden del procedimiento de sujeción de la muestra.	100
Figura 69. Esquema vista lateral del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga.	100
Figura 70. Esquema del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga, vista superior.	101
Figura 71. Esquema del aparato Cox en el ensayo de flexión de la viga a la fatiga, vista frontal.	101
Figura 72. Esquema y foto del aparato IPC en el ensayo de viga a flexión de fatiga (nuevo modelo), vista lateral.	102
Figura 73. Desplazamiento en el aparato de IPC (se muestra los primeros modelos) se mide con un sensor situado en la parte superior de la muestra.	104
Figura 74. Módulo complejo normalizado x ciclos vs Ciclos.	104

RELACIÓN DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Granulometría para mezclas con tamaño nominal 19 mm. (3/4 ").	24
Gráfica 2. Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de graduación densa (DFG - Mezcla densa de granulometría fina, DCG - Mezcla densa de granulometría gruesa).	25
Gráfica 3. Gráfica Ensayo de Tracción Desplazamiento vs Fuerza.	48
Gráfica 4. Curvas de Fatiga en Aceros.	49
Gráfica 5. Resultados del Ensayo de Fatiga según Autores.	52
Gráfica 6. Gráfica curvas S-N de la Fatiga en los Aceros.	54
Gráfica 7. Gráfico de Carga-Deformación en el Ensayo Brasileño.	57
Gráfica 8. Gráfica de la Señal Sinusoidal.	66
Gráfica 9. Evolución del Módulo Complejo en Función del Número de Ciclos de Carga.	73
Gráfica 10. Evolución de la Deformación en Función del Número de Ciclos de Carga.	74
Gráfica 11. Evolución del Ángulo de Fase en Función del Número de Ciclos de Carga.	74
Gráfica 12. Evolución de la Temperatura en Función del Tiempo. José Eduardo García Servín.	82
Gráfica 13. Evolución de la Deformación en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.	83
Gráfica 14. Evolución del Módulo Complejo respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.	83
Gráfica 15. Evolución del Ángulo de fase en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.	84
Gráfica 16. Evolución del Esfuerzo Aplicado en Función del Número de Ciclos de Carga aplicados en el Ensayo de Fatiga. José Eduardo García Servín.	85
Gráfica 17. Evolución de la Energía Disipada respecto al Número de ciclos de carga. José Eduardo García Servín.	85

Gráfica 18. Evolución de la Energía Normalizada respecto al Número de ciclos de carga.
José Eduardo García Servín. 86

Gráfica 19. Evolución del Nivel de Daño que presentó la viga respecto al Número de
ciclos de carga. José Eduardo García Servín. 88

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.	21
Tabla 2. Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.	23
Tabla 3. Tabla del Material Pétreo de granulometría Densa.	23
Tabla 4. Definición de Mezclas de Graduación Densa, Gruesa y Fina.	24
Tabla 5. Ventajas de las Mezclas de Granulometría Densa, Gruesa y Fina.	25
Tabla 6. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.	27
Tabla 7. Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.	27
Tabla 8. Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.	28
Tabla 9. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica.	29
Tabla 10. Esfuerzo requerido para la compactación giratoria según el tránsito esperado en el carril de diseño.	30
Tabla 11. Número mínimo de pasadas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.	36
Tabla 12. Especificaciones de rodera máxima con el Analizador de Pavimentos Asfálticos. APA para 8,000 ciclos.	37
Tabla 13. Velocidad máxima de deformación para el diseño de mezclas asfálticas mediante la máquina de pista en mm/min para el intervalo de 105 a 120 minutos.	38
Tabla 14. Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa.	40
Tabla 15. Cuadro de datos para obtener el Valor de la Energía Normalizada.	87
Tabla 16. Prueba de los requisitos mínimos del sistema	92

Tabla 17. Tabla de resultados.	106
Tabla 18. Fatiga del concreto asfáltico	109

SIGLAS

AASHTO.- American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte).

AMMAC.- Asociación Mexicana del Asfalto A.C.

APA.- Analizador de Pavimentos Asfálticos.

ASTM.- American Section of the International Association for Testing Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

CAPUFE.- Caminos y Puentes Federales.

CEDEX.- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

DGCB.- Departamento de Ingeniería Civil y Edificación (Siglas en Francés).

ENTPE.- Escuela Nacional de Trabajos Públicos del Estado (Siglas en Francés).

GCTS.- Consultoría Geotécnica y Sistemas de ensayo.

HMA.- Hot Mix Asphalt Mezcla de Asfalto en Caliente.

IMT.- Instituto Mexicano del Transporte.

LCPC.- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Laboratorio Central de Puentes y Caminos).

MR.- Módulo de Ruptura.

NAPA.- National Asphalt Pavement Association (Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos).

SCT.- Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

SUPERPAVE.- Realización Superior de Pavimentos Asfálticos (Siglas en Inglés).

U.S. - Ondas Ultrasonoras.

BIBLIOGRAFÍA

[1] http://es.wikipedia.org/wiki/Mezcla_asf%C3%A1ltica

[2] <http://es.scribd.com/doc/91044691/Clase-12-04-12-Mezcla-Asfaltica>

[3] Garnica Anguas Paul, Delgado Alamilla Horacio y Sandoval Sandoval Carlos Daniel, ANÁLISIS DE VARIANZA DEL EFECTO DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, Publicación Técnica No. 272, Sanfandila, Qro, 2005.

<http://es.scribd.com/doc/63348158/51/Caracteristicas-de-la-mezcla-asfaltica>

[4] H. Delgado, Comportament á la Fatigue d'Enrobés Bitumineux Renforcés de Fibres Végétales, Memoria de Maestría en investigación, Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2008.

[5] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>

[6] Di Benedetto H., Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique. In: RILEM. Ensayos mecánicos en mezclas asfálticas, 1990, Budapest, pp 387-401.

[7] IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO AMAAC PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS – PARTE 2

Padilla Cabrera Montserrat Estefania¹, monestef@hotmail.com,
Dr. Francisco Antonio Horta Rangel², anthort@hotmail.com

[8] [Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011, Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño]

[9] Yann Lefeuvre. Contribution á l'étude du comportement en fatigue des enrobes bitumineux: Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffuse, Expérimentation-Modélisation. Tesis: Escuela Nacional de Camino y Puentes, 2001.

[10] <http://es.scribd.com/doc/35165762/Fatiga-de-Los-Materiales>

[11] http://www.amarun.org/pdf/articulos/toasa_05-09.pdf

[12] <http://es.knowledger.de/2384991/AugustWohler>

[13] Bodin D., Pijaudier-Cabot G., de la Roche C., Chabot A. Predictions of the intrinsic damage during bituminous mixes fatigue test. In: RILEM. Simposio en pruebas de desempeño y evaluación de materiales asfálticos, 2003, Zúrich, Suiza.

[14] Perraton D., Baaj H., Di Benedetto H., Paradis M., Evaluation de la résistance á la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai: aspects fondamentaux et application á l'enrobé á matrice de perre. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, n°30, pp. 902-913.

- [15] <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/tecnologia/Ensayotraccion/Ensayodetraccion.htm>
- [16] <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/tecnologia/ensayos.htm>
- [17] <http://www.construmatica.com/construpedia/Categor%C3%ADa:C%C3%A1culo de Estructuras de Acero>
- [18] <http://es.scribd.com/doc/7515076/Pruebas-de-Lab-Concreto>
- [19] <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf>
- [20] Yang H. Huang, Pavement Analysis and Design, Second Edition, 2004, pp 309-317.
- [21] <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1276/127622720006.pdf>
- [22] http://es.wikipedia.org/wiki/Fatiga_de_materiales
- [23] Houel A. Endommagement á la fatigue et fissuration mécanique des enrobés bitumineux sur dalle orthotrope. Tesis: Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2007, 305 p.
- [24] <http://es.scribd.com/doc/69370641/21/Ensayo-triaxial-dinamico/pp.97-98>
- [25] RAO TANGELLA S.C.S., CRAUS J., DEACON J. A., MONISMITH C.L. "Summary report n fatigue response of asphalt mixtures" SHRP project A-003-A, Berkeley: Institute of Transportation Studies University of California, February 1990, 147 p.
- [26] http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-15X2012000100009&script=sci_arttext
- [27] LINDER R., MOUTIER F., PENET M., et al. "La machine d'essais rhéologiques asservie (MAER-LCP) et utilisation pour l'essai de traction LPC sur enrobes" Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, mars-avril 1986, n° 142, p. 132-138
- [28] Doan T.H. Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC. Boletín informativo de los laboratorios de caminos y puentes, número especial V, p. 215-228, 1977.
- [29] <http://www.krconsult.com/cursos/redes2/conbas3.htm#>
- [30] Tsai B.W., Harvey J.T., Monismith C.L., High temperatura fatigue and fatigue damage process of aggregates-asphalt mixtures. Proceeding of the association of Asphalt Paving Technologists, 2002, p 365-407.
- [31] Arnaud L. Houel A. Fatigue Damage of Asphalt Pavement on an Orthotropic Bridge Deck. Mechanical Monitoring with Ultrasonic Wave Propagation. Road Materials and Pavement Desing. Vol. 8/3 – 2007 – pp. 505-522
- [32] Soltani A. Comportament en fatigue des enrobes bitumineux. Tesis: Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2008.
- [33] Evaluación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas, Horacio Delgado*-Laurent Arnaud**