

**ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LA FATIGA DE  
MATERIALES BITUMINOSOS**

**SILVIA VIVIANA GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
SIUL ENITH VELANDIA ARGÜELLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2006**

**ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LA FATIGA DE  
MATERIALES BITUMINOSOS**

**SILVIA VIVIANA GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
SIUL ENITH VELANDIA ARGÜELLO**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:  
ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2006**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Las autoras expresan su agradecimiento:**

A Eduardo A. Castañeda P., Ingeniero Civil y Director de la Investigación, profesor titular de la escuela de Ingeniería Civil, UIS, por su compromiso y colaboración.

A Luis G. Loria, Ingeniero civil, Comité de investigación LANAMME, en Costa Rica, Comité de Investigación en Pavimentos, Universidad de Nevada, en Reno (EE.UU.), por su colaboración, aportes y sus valiosas orientaciones.

A Carlos Wahr Daniel, Ingeniero civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, por su colaboración, aportes y sus valiosas orientaciones.

A Rodrigo Miró Recasens, Ingeniero civil, Profesor Titular de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, España, por su colaboración, aportes y sus valiosas orientaciones.

A Oscar J. Reyes O., Ingeniero civil, actualmente realizando un doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña, España, parte del grupo de investigación de la Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, por su colaboración, aportes y sus valiosas orientaciones.

A Fernando Dueñas L, Ingeniero Civil, Director Comercial de ETA S.A., por su colaboración e incondicional apoyo.

A Nuestros familiares, por su colaboración, apoyo y toda su paciencia.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>CAPITULO I</b>	
<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>4</b>
1.1 FATIGA EN MATERIALES .....	4
1.1.1 Propagación de los daños por Fatiga.....	5
1.1.2 Acumulación De Daños: Ley De Miner.....	8
1.1.3 Límite De Fatiga.....	9
1.2 FATIGA EN DIFERENTES MATERIALES .....	10
1.2.1 Fatiga En Metales.....	10
1.2.2 Fatiga en Materiales Tratados con Ligantes Hidráulicos.....	11
1.2.3 Fatiga en Materiales Asfálticos .....	12
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>FATIGA EN PAVIMENTOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 MÉTODOS DE PRUEBA DE FATIGA.....	14
2.1.1 Flexión Simple .....	16
2.1.1.1 Modos de Prueba.....	16
2.1.1.2 Ventajas y limitaciones.....	25
2.1.2 Flexión apoyada .....	25
2.1.2.1 Ventajas y limitaciones.....	26
2.1.3 Axial directo .....	27
2.1.3.1 Modos de Prueba.....	27
2.1.4 Ensayo diametral .....	29
2.1.4.1 Ventajas y limitaciones.....	34
2.1.5 Ensayo Triaxial .....	35
2.1.5.1 Ventajas y limitaciones.....	36
2.1.6 Ensayos de propagación de la fractura.....	36
2.1.6.1 Modo de prueba.....	38
2.1.6.2 Ventajas y limitaciones.....	44
2.1.7 Ensayo Wheel - Track.....	44
2.1.7.1 Modos de prueba.....	44

<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
3.1 ANÁLISIS TRADICIONAL.....	47
3.1.1 Análisis por Esfuerzo o Deformación Controlada .....	47
3.2 NUEVOS ENFOQUES DE ANÁLISIS .....	49
3.2.1 Enfoque Energético .....	49
3.2.2 Disipación Térmica .....	52
3.2.3 Auto reparación .....	52
3.2.4 Elementos Finitos .....	55
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>EFFECTOS DE DIFERENTES PARAMETROS QUE AFECTAN LA VIDA EN FATIGA.....</b>	<b>58</b>
4.1 PARÁMETROS TENIDOS EN CUENTA POR EL ANÁLISIS DE LA VIDA EN FATIGA .....	58
4.1.1 Forma, Tamaño y Textura De Los Agregados .....	58
4.1.2 Tipo de Asfalto.....	58
4.1.3 Contenido de Ligante Asfáltico.....	59
4.1.4 Contenido de Vacíos.....	60
4.1.5 Granulometría.....	62
4.1.6 Tipo y Contenido de Modificadores.....	62
4.1.7 Temperatura .....	63
4.1.8 Tipo de Carga Aplicada.....	64
4.1.9 Contenido de Agua .....	64
4.1.10 Modo de Carga .....	65
4.1.11 Intervalo de Tiempo entre Cargas Sucesivas.....	65
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA No. 1	Curvas S-N
FIGURA No. 2	Crecimiento de grieta por fatiga en metales
FIGURA No. 3	Curva de Whöler
FIGURA No. 4	Ensayos para los materiales tratados con Ligantes Hidráulicos
FIGURA No. 5	Modelo tradicional de fatiga en mezclas asfálticas
FIGURA No. 6	Curva de Wöhler por esfuerzo controlado
FIGURA No. 7	Curva de Wöhler por Deformación Controlada
FIGURA No. 8	Estado tensional en un pavimento bajo carga simple
FIGURA No. 9	Diferentes pruebas de laboratorio para caracterizar la fatiga
FIGURA No. 10	Máquina para prueba trapezoidal
FIGURA No. 11	Ensayo a flexión en muestras trapezoidales y contacto en dos puntos
FIGURA No. 12	Principio de la prueba de flexión sobre probeta trapezoidal
FIGURA No. 13	Características geométricas de las probetas trapezoidales
FIGURA No. 14	Máquina Torsional
FIGURA No. 15	Flexión en tres puntos
FIGURA No. 16	Apoyo en 4 puntos y distribución de carga
FIGURA No. 17	Ensayo de fatiga de la SHRP en cuatro puntos
FIGURA No. 18	Flexión apoyada
FIGURA No. 19	Ensayo de Tensión / Compresión
FIGURA No. 20	Esquema de probeta bajo Tracción Indirecta
FIGURA No. 21	Configuración de la carga y rotura del ensayo de tracción indirecta, Kennedy
FIGURA No. 22	Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta
FIGURA No. 23	Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta
FIGURA No. 24	Visualización más cercana del ensayo de la probeta a Tracción Indirecta.
FIGURA No. 25	Máquina para ensayo triaxial
FIGURA No. 26	Modos de ensayo para ensayos de propagación de la fractura
FIGURA No. 27	Etapas del ensayo BTD (aplicación de la carga, y fin de la misma)

FIGURA No.	28	Curva de rotura que se obtiene del Modo Estático
FIGURA No.	29	Probeta a Tracción y Carga aplicada en la etapa dinámica del ensayo
FIGURA No.	30	Deformación crítica “dC” del <i>ensayo</i>
FIGURA No.	31	Carrusel de Fatiga, Universidad de Los Andes (Bogotá D.C.)
FIGURA No.	32	Curvas típicas de Fatiga
FIGURA No.	33	Probeta fracturada
FIGURA No.	34	Gráfica Criterio de falla por rigidez
FIGURA No.	35	Gráfica Criterio de falla por Deformación
FIGURA No.	36	Gráfica Criterio de falla por Fuerza
FIGURA No.	37	Pulso Sinusoidal y Harvesine

### LISTA DE TABLAS

TABLA No.	1	Características de los asfaltos utilizados
TABLA No.	2	Efecto del tipo de ensayo

## LISTA DE ECUACIONES

### CAPÍTULO I

ECUACIÓN No.	1.1	Factor de intensidad de esfuerzos
ECUACIÓN No.	1.2	Razón de esfuerzos mínimos a máximos
ECUACIÓN No.	1.3	Relación del factor de intensidad de esfuerzos
ECUACIÓN No.	1.4	Variación de intensidad de esfuerzos
ECUACIÓN No.	1.5	Variación de esfuerzos
ECUACIÓN No.	1.6	Modelo de comportamiento de grietas de Paris
ECUACIÓN No.	1.7	Modelo de comportamiento de grietas de Donahue
ECUACIÓN No.	1.8	Modelo de comportamiento de grietas de Foreman
ECUACIÓN No.	1.9	Variación intensidad de esfuerzos, Foreman
ECUACIÓN No.	1.10	Valor crítico de variación de intensidad de esfuerzos
ECUACIÓN No.	1.11	Ley de Miner
ECUACIÓN No.	1.12	Ley de Miner con adición de daños
ECUACIÓN No.	1.13	Ley de Miner General
ECUACIÓN No.	1.14	Ley de Miner con $\sigma_1 > \sigma_2$
ECUACIÓN No.	1.15	Ley de Miner con $\sigma_1 < \sigma_2$
ECUACIÓN No.	1.16	Relación de curva de Whöler

### CAPÍTULO II

ECUACIÓN No.	2.1	Flexión simple Pell, Monismith
ECUACIÓN No.	2.2	Flexión simple Pell, Monismith
ECUACIÓN No.	2.3	Valor de esfuerzo máximo, flexión en dos puntos
ECUACIÓN No.	2.4	Valor de deformación máximo, flexión en dos puntos
ECUACIÓN No.	2.5	Relación de deformación versus ciclos de carga, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.6	El esfuerzo aplicado pico a pico, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.7	Deformación, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.8	Rigidez, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.9	Angulo de fase, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.1	Energía disipada, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.1	Módulo de elasticidad, flexión en 4 puntos
ECUACIÓN No.	2.1	Tensión horizontal, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.1	Tensión vertical, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.1	Tensiones tangenciales, tracción indirecta

ECUACIÓN No.	2.2	Tensiones en el plano diametral vertical, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.2	Tensiones en el plano diametral vertical, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.2	Tensiones en el plano diametral vertical, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.2	Resistencia a tracción, tracción indirecta
ECUACIÓN No.	2.2	Ecuación básica de la segunda fase, ensayos de la propagación de la fractura
ECUACIÓN No.	2.2	Modelo de propagación de grieta, ensayos de propagación de la fractura
ECUACIÓN No.	2.2	Energía de fractura, BTD
ECUACIÓN No.	2.2	Resistencia máxima de tracción, BTD
ECUACIÓN No.	2.2	Deformación unitaria de la fibra inferior, BTD
ECUACIÓN No.	2.2	Deformación unitaria de la fibra inferior, BTD
ECUACIÓN No.	2.3	Moódulo de rigidez, BTD

### **CAPÍTULO III**

ECUACIÓN No.	3.1	Densidad de la energía local
ECUACIÓN No.	3.2	Energía total acumulada
ECUACIÓN No.	3.3	Energía disipada acumulada
ECUACIÓN No.	3.4	Energía disipada por ciclo
ECUACIÓN No.	3.5	Número de Ciclos a la ruptura
ECUACIÓN No.	3.6	Energía proporcional

### **CAPÍTULO IV**

ECUACIÓN No.	4.1	Factor de corrección proporcional
ECUACIÓN No.	4.2	Volúmen de asfalto
ECUACIÓN No.	4.3	Curva calibrada de laboratorio

### **CAPÍTULO V**

ECUACIÓN No.	5.1	Parámetro de daño
ECUACIÓN No.	5.2	Variación del parámetro de daño
ECUACIÓN No.	5.3	Ley propuesta por Piau

## RESUMEN

**TÍTULO: ESTADO DEL ARTE EN EL ESTUDIO DE LA FATIGA DE MATERIALES BITUMINOSOS\***

**AUTORAS: SILVIA VIVIANA GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
SIUL ENITH VELANDIA ARGÜELLO\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Estado del arte, Fatiga, Materiales Bituminosos, Pavimentos, Ensayos, Pruebas, Nuevos enfoques.

**DESCRIPCIÓN:** La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de la carpeta asfáltica; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga. Para establecer el punto de partida para un programa de investigación en fatiga de materiales bituminosos se hizo necesaria la recolección de la información existente sobre este tipo de falla, la cual mostró que existen dos formas de solicitar el material en laboratorio, con esfuerzo controlado o deformación controlada, y a través de estas sollicitaciones, existen varios métodos tradicionales para la realización de los ensayos, siendo algunos de estos, Flexión, Flexión apoyada, Axial directo, Diametral, Triaxial, Propagación de la Fractura, y Wheel Track; estableciéndose los parámetros más influyentes en el comportamiento de la vida en fatiga del pavimento. Además, en la actualidad se pretende corregir diversos errores que se cometen al realizar las pruebas en laboratorio para poder estandarizar los resultados obtenidos cualquiera que sea el modo de sollicitación y tipo de ensayo, para lo que se están estudiando algunos nuevos enfoques que incluyen, la Disipación Térmica, el enfoque Energético, la capacidad de Auto-reparación del pavimento y la herramienta computacional Elementos Finitos para el estudio de este tipo de falla.

\* Trabajo de investigación

\*\* Facultad de Ciencias Fisicomecánicas, escuela de Ingeniería Civil, Eduardo Castañeda.

## SUMMARY

**TITLE: STATE OF THE ART ON THE FATIGUE'S STUDY OF BITUMINOUS MATERIALS.\***

**AUTHORS: SILVIA VIVIANA GONZÁLEZ RODRÍGUEZ  
SIUL ENITH VELANDIA ARGÜELLO\*\***

**KEY WORDS: State-of-the-art, Fatigue, Bituminous materials, Pavements, Tests, New approaches.**

**ABSTRACT:** The structural flaw in a pavement appears when the materials which form the structure, being dragged to repetitions of load by action of the transit, they undergo a structural cracking related to the deformation or the horizontal tension by traction in the base of the asphalt layer; this way, the flaw relates the deformation or the tension produced with the number of permissible repetitions; this is called denominates fault by fatigue, which means by repetitions of load. In order to establish the departure point for a research program in fatigue of bituminous materials the harvesting was made necessary of the existing information on this type of flaw, which showed that two forms exist to ask for the material in laboratory, with controlled stress or controlled strain, and through these requesting, there are several traditional methods for the accomplishment for the essays making, being some of these, Flexion, supported Flexion, Axial direct, Diametrical, Triaxial, Propagation of fractures, and Wheel Track; settling down the most influential parameters in the behaviour of life in fatigue of the pavement. Besides, currently it is pretend to correct diverse errors that commit when making the tests in laboratory in order to be able to standardize the obtained results, whatever it is the way of requesting and type of test for which some new approaches are being studied and they include, the Thermal Dissipation, the Power approach, the capacity of Car-repair of the pavement and the computational tool Finite Elements for the study of this type of flaw.

\* Work of investigation

\*\* Faculty of Fisicomecánicas Sciences, School of Civil Engineering, Eduardo Castañeda.

## INTRODUCCIÓN

En los pavimentos flexibles se presentan daños que comprometen la capacidad estructural y daños en la capa de rodadura que no afectan, al menos al principio, la capacidad estructural del pavimento.

La fisuración por fatiga es un tipo de deterioro que con mucha frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella (en la dirección del tránsito) son un signo prematuro de la fisuración por fatiga. Esta es un deterioro de tipo progresivo porque, en algún momento, las fisuras iniciales se unirán con otras, causando aún más fisuras. En algunos casos extremos, el estado final de la fisuración por fatiga es la desintegración con la formación de baches.

Si bien el mecanismo de fatiga es fácil de comprender, sus causas no siempre lo son, no puede enfocarse como un problema de los materiales exclusivamente; La fisuración por fatiga es usualmente causada por un número de factores que deben producirse simultáneamente.

Este documento presenta el estado del arte sobre el fenómeno de fatiga en las mezclas asfálticas. Es una guía en el uso de ensayos para la fatiga no establecidos en la normativa actual del país, por lo que se espera que la práctica de diseño de la estructura de los pavimentos, teniendo en cuenta este parámetro, mejore y avance continuamente.

Dentro del contexto del diseño de pavimentos se acepta que el dimensionamiento de estas estructuras permite que se establezcan las características de los materiales de las distintas capas del pavimento y los espesores, de tal forma que el pavimento mantenga un "índice" de servicio aceptable durante la vida de servicio estimada.

La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga. Estos fenómenos que se producen en el pavimento durante su funcionamiento, pueden ser modelados en el laboratorio haciéndose los llamados ensayos de fatiga.

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos ensayos de laboratorio, calibraciones y posteriores modelos in situ. Por ello se suele recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos.

En la escuela de ingeniería civil de la UIS no ha existido ningún interés en el tema de fatiga, ya sea sobre materiales bituminosos o cualquier otro material. Sin embargo, la evaluación del comportamiento mecánico de estructuras exige

abordar este tema. La recopilación de información es el primero paso para estudiar este fenómeno.

En las bases de esta propuesta, se plantea la importancia de la fatiga en el momento de diseñar pavimentos flexibles, es decir, la preocupación de la falta de conocimiento de este tipo de falla, estará centrada en la implementación de un documento con los avances hechos fuera del contexto nacional sobre el tema.

La investigación, entonces, debe asegurar que se logre un conocimiento más profundo, relacionado y globalizado con significación profesional de modo que sea efectivo en situaciones nuevas y sirva para seguir aprendiendo ante las crecientes y múltiples variaciones en el área de estudio.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Establecer el punto de partida para un programa de investigación en fatiga de materiales bituminosos.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y conocer los diferentes métodos que se siguen actualmente para el estudio de la fatiga, una de las principales causas de falla de pavimentos flexibles.
- Adquirir información sobre el avance de la investigación de la fatiga de materiales bituminosos.
- Recopilar la información y en dado caso hacer las modificaciones necesarias para llevarla a la lengua castellana y de esta manera facilitar el acceso a la misma.
- Ampliar los conocimientos sobre estudios de este tipo de falla de los pavimentos de nuestro país.
- Dar a conocer los avances en los estudios que se han realizado en diversas partes del mundo, plasmando cada uno de los métodos encontrados.

# CAPITULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 FATIGA EN MATERIALES

La fatiga es un fenómeno que se asocia con la disminución de la resistencia mecánica de un material en el tiempo cuando se le aplican esfuerzos dinámicos que, en promedio, son inferiores al valor de cedencia. De acuerdo con la teoría de elasticidad lineal de los materiales, en estos casos no se debería presentar modificación alguna en las propiedades mecánicas en el tiempo; sin embargo, en la práctica así ocurre. Esto último se explicó en la teoría del medio continuo como un fenómeno en el que los materiales se “fatigaban” o deterioraban cuando se someten a cargas cíclicas y cuyo comportamiento obedece a la relación establecida en las llamadas curvas S-N (esfuerzo-número de ciclos; Figura 1) o en las ecuaciones de Coffin-Manson; las cuales están basadas en pruebas empíricas que toman valores estadísticos y que suponen que las características microestructurales del material son constantes y uniformes. En realidad, la fatiga es un fenómeno que tiene su origen en la no-linealidad o no-uniformidad del material y que, de manera local, contiene defectos, impurezas o discontinuidades que actúan como concentradores de esfuerzos muy localizados y que sobrepasan la capacidad de resistencia del material en esas zonas. Por lo general, al inicio de la vida de un componente, estas imperfecciones son muy pequeñas y no tienen ningún efecto sobre el desempeño de la pieza, pero con el tiempo, a partir de éstas se generan grietas que pueden crecer y degradar al material e inclusive, llegar a fracturarse totalmente.

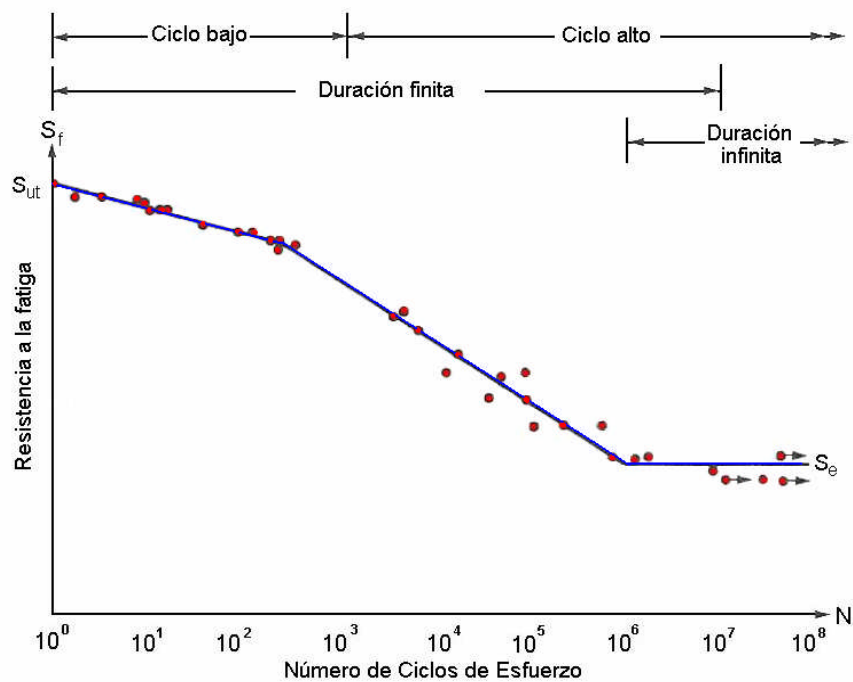


Figura 1 Curvas S-N

Si nos preguntamos cuando falla un material por fatiga y damos respuesta utilizando la definición clásica, la solución sería: Cuando el material alcanza el 50% de su rigidez.

### 1.1.1 Propagación de los daños por Fatiga

En un estudio sobre el “Efecto de la Rugosidad de las Carreteras en el daño a Vehículos” realizado por la Secretaría de comunicaciones y Transporte (SCT) y el instituto Mexicano del Transporte (IMT), expresan que una herramienta muy útil que nos permite conocer el cómo se generan, crecen y se propagan las grietas causadas por la fatiga, es la mecánica de la fractura. Aplicando esta teoría, es posible evaluar el efecto de una grieta sobre la resistencia de un componente considerando sus características propias y particulares, y en general, puede resolver cuantitativamente aspectos tales como el conocer la resistencia de un material en función del tamaño de grieta, saber el tamaño de grieta máximo que puede ser tolerado en un material en servicio, estimar el tiempo que tarda una grieta determinada para alcanzar el tamaño máximo permisible, calcular la vida en servicio de estructuras cuando se sabe que tienen defectos preexistentes con determinados tamaños y saber con qué frecuencia y cómo se debe inspeccionar un elemento mecánico para detectar una grieta y evitar una falla catastrófica.

Para cada uno de los aspectos antes mencionados, se debe conocer el nivel de esfuerzos en el elemento mecánico o estructural de interés, que a su vez, depende de su geometría y las condiciones de carga. Por otra parte, es importante determinar propiedades de la mecánica de la fractura que se asocian con el valor límite o umbral para el inicio de crecimiento de grietas, la velocidad de crecimiento de las mismas y el valor crítico a la ruptura.

#### Principios generales de la mecánica de la fractura

En la mecánica de la fractura el parámetro más importante que se tiene que establecer es el factor de intensidad de esfuerzos K, el cual se relaciona con el tamaño de un defecto o grieta y el nivel de esfuerzos a que se somete el material.

De manera general este factor se expresa de la siguiente forma:

$$K = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{q}} Y \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Donde:

K = Factor de intensidad de esfuerzos  
a = Longitud de la grieta o defecto  
 $\sigma$  = Esfuerzo aplicado  
q = Parámetro de forma de la grieta  
Y = Factor geométrico

El factor geométrico es adimensional y depende de la geometría del componente y de la grieta pero es independiente del tipo de material.

Cuando en una grieta el factor de intensidad de esfuerzos llega a un valor crítico KIC, que es una propiedad del material y no depende de la geometría ni de las condiciones de carga, se presenta el crecimiento inestable de la grieta y, por consiguiente, la fractura total. Este valor crítico es el que define la tenacidad o resistencia a la fractura de un material y se asocia a un tamaño de grieta crítico  $a_c$  a través de la ecuación. Se puede ver claramente que existe una relación de proporcionalidad entre el valor de tenacidad y el tamaño crítico de grieta y, por lo tanto, si se desea incrementar la resistencia a la fractura de un componente, es necesario utilizar un material con el mayor valor de KIC.

Al analizar el fenómeno de fatiga mediante la mecánica de la fractura, hay que considerar adicionalmente los valores de esfuerzo máximo  $\sigma_{\text{máx}}$ , esfuerzo mínimo  $\sigma_{\text{mín}}$  y la razón de esfuerzos mínimo a máximo

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

ya que mediante éstos se toma en cuenta el efecto dinámico del problema. Dependiendo de la forma en que se aplican las cargas dinámicas y estáticas, R toma valores de  $-1$  a  $+1$ , siendo que en ciclos de compresión-compresión  $R > 0$ , tensión-tensión  $R = 0$ , tensión – compresión  $R < 0$  y tensión-compresión completamente reversa  $R = -1$ . Por otra parte, la expresión que relaciona la fluctuación del factor de intensidad de esfuerzos con la variación de esfuerzos es:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Donde:

$$\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Para describir el proceso de propagación de grietas por fatiga, se deben considerar tres etapas: la de iniciación de grietas, la de crecimiento estable y la de crecimiento inestable. La Figura No. 2 muestra el comportamiento típico del crecimiento de grieta en la que la velocidad de crecimiento de grietas  $\frac{da}{dN}$  se

grafica como función de la variación del factor de intensidad de esfuerzos  $\Delta K$ . En la primera etapa, para que se presente la iniciación del crecimiento de grietas, se requiere que el valor de  $\Delta K$  sea mayor que un determinado valor que es propio del material y que se denota como  $\Delta K_{th}$  y se identifica como el valor del umbral para el crecimiento de grietas. Una vez que este valor límite es superado, ya sea porque el tamaño de grieta es suficientemente grande o porque el nivel de esfuerzos llega al valor mínimo requerido, el crecimiento de grieta se presenta

con una velocidad muy lenta pero con una razón de cambio alta y que corresponde a la fase de iniciación de grietas o etapa I.

La etapa II o de crecimiento estable describe el crecimiento de una grieta por fatiga en un amplio rango de valores de  $\Delta K$  que cubre tamaños muy pequeños de grieta hasta muy poco antes de alcanzar el valor crítico de ruptura. Se puede decir que esta etapa es la más importante, ya que comprende, en la mayoría de los casos, tamaños de grieta que comienzan a ser detectados por las técnicas tradicionales de inspección no destructiva, hasta tamaños cercanos al crítico.

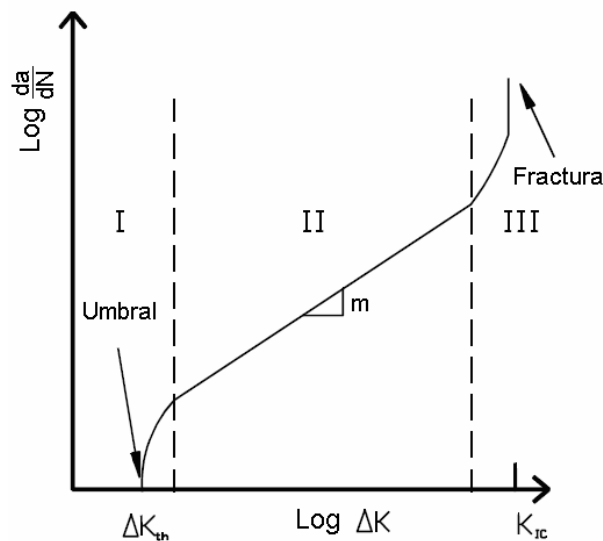


Figura 2 Crecimiento de grieta por fatiga en metales

El modelo más común para describir el comportamiento de grietas por fatiga en la etapa estable es el propuesto por Paris, que se representa por la ecuación siguiente:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

donde C y m son propiedades constantes del material que se determinan experimentalmente.

Con la anterior ecuación se puede estimar, a partir de un valor inicial de grieta  $a_i$ , el número de ciclos de fatiga necesarios para llegar al valor crítico  $a_c$ , con lo que se determina la vida útil o remanente de una pieza bajo ciertas condiciones determinadas. Es importante notar que en el modelo de Paris la razón de esfuerzos R no tiene influencia sobre la velocidad de crecimiento y que es válida cuando ésta toma valores cercanos a 0.1. En la realidad, la velocidad de crecimiento de grietas es afectada por la relación R ; entre más positiva sea esta razón, los valores de crecimiento son más altos debido a que disminuye el efecto del fenómeno llamado cerradura de la grieta. La cerradura de la grieta se define como el proceso en el que las dos superficies de la fractura en la zona de la punta de la grieta, se ponen en contacto antes de que alcance el esfuerzo mínimo en un ciclo tensión-tensión o se llegue al esfuerzo cero en un ciclo tensión-compresión.

Por último, en la región III, la curva de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga incrementa súbitamente su pendiente, ya que el factor de intensidad de esfuerzos máximo en un ciclo de carga se acerca cada vez más al factor de intensidad de esfuerzos crítico K<sub>IC</sub>, lo que significa que cada vez se acerca a la condición inestable con velocidades de crecimiento muy altas.

Para describir el crecimiento por fatiga existen, además del modelo de Paris ya mencionado, otros modelos que consideran las etapas de crecimiento inicial y de crecimiento crítico, por lo que toman en cuenta el valor de R. De estos, podemos mencionar el modelo de Donahue (1984) que se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

O bien, el modelo de Foreman (1984) cuya velocidad de crecimiento de grieta se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^m}{(1-R)K_I - \Delta K} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Donde:

$$\Delta K = (1-R)K_I \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

$$\text{El valor crítico es } \Delta K_c = (1-R)K_{IC} \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Como se puede observar en la ecuación se toma en cuenta el efecto de la relación R.

Estas expresiones suponen el crecimiento de la grieta en condiciones elásticas, ninguna incorpora una dependencia histórica y por consiguiente, son estrictamente válidas para amplitud de carga constante.

### 1.1.2 Acumulación De Daños: Ley De Miner

La Ley de Miner (1945) puede interpretarse como la proporción del capital de fatiga que ha sido consumido bajo el esfuerzo que ha sido aplicado; a esta proporción se llama daño de fatiga. Dado que en la práctica las sollicitaciones se distribuyen al azar se puede asegurar que nunca ocurren sollicitaciones idénticas, siendo:

n<sub>1</sub> el número de sollicitaciones de amplitud s<sub>1</sub>

s<sub>1</sub> sollicitaciones superiores al límite de fatiga

N<sub>1</sub> duración de vida de la aplicación de la amplitud □<sub>1</sub>

n<sub>2</sub> el número de sollicitaciones de amplitud s<sub>2</sub>

s<sub>2</sub> sollicitaciones que conllevan a la ruptura del material

N<sub>2</sub> duración de vida de la aplicación de la amplitud □<sub>2</sub>

Y:  $n_1 < N_1$

Entonces: 
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

Denominando  $n_1 / N_1 = d_1 =$  daño de fatiga.

Entonces: 
$$\frac{n_2}{N_2} = 1 - d \quad \text{supone la adición de daños.} \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

Generalizando la Ley de Miner, dado el caso de un gran número de secuencia de cargas repetidas, de amplitud diferente para cada secuencia. La condición de ruptura por fatiga se expresa:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (\text{Ecuación 1.13})$$

El trabajo original de Miner arroja que experimentalmente el valor de la sumatoria varía de 0.61 a 1.45. Sin embargo un gran número de experimentos muestran que esta ley no es exacta.

Si se inicia por aplicar el nivel de esfuerzo más elevado, la duración de vida total es en general más débil que si se aplica antes el nivel de esfuerzo más bajo.

Si  $\sigma_1 > \sigma_2$  la ruptura por fatiga se produce 
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} < 1 \quad (\text{Ecuación 1.14})$$

Si  $\sigma_1 < \sigma_2$  la ruptura por fatiga se produce 
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} > 1 \quad (\text{Ecuación 1.15})$$

### 1.1.3 Límite De Fatiga

Para materiales tales como aceros, se puede constatar que a un cierto valor de amplitud de la sollicitación se le puede aplicar un número infinito de veces sin que haya ruptura, esta sollicitación se llama límite de fatiga. Para los metales este límite de fatiga se encuentra entre 0.3 y 0.6; siendo 0.3 para los materiales de una resistencia elevada y de ruptura instantánea frágil. Los valores cercanos a 0.6 corresponden a los materiales de resistencia más débil y ruptura instantánea dúctil. Para ciertos materiales como las bases bituminosas, nunca se les ha podido evidenciar el límite de fatiga, y puede haber fatiga cualquiera que sea el valor de la amplitud de la sollicitación. [Fredy Reyes, 2003]

## 1.2 FATIGA EN DIFERENTES MATERIALES

### 1.2.1 Fatiga En Metales

El primer estudio sobre fatiga en metales se cree que fue realizado alrededor del año 1829 por un ingeniero minero de origen alemán llamado W.A.J. Albert (Zurres, 1998). Este ingeniero efectuó pruebas de cargas repetidas en cadenas de izado hechas de hierro, pero su verdadero interés surgió en 1842 cuando en Versalles, Francia sucedió un accidente ferroviario con pérdida de vidas humanas y se adelantó una investigación en fatiga de materiales (Smith, 1990). La causa de este accidente fue descrita como falla por fatiga originada en el eje frontal de la locomotora.

En 1849, el gobierno británico comisionó a E.A. Hodgkinson para estudiar la fatiga ocasionada y observada en el acero usado en los puentes de ferrocarril. El informe efectuado describe experimentos de flexión alternada efectuados sobre vigas cuyos puntos medios fueron repetidamente flexionados por una leva rotacional. En estos mismos años, investigaciones sobre fractura por fatiga fueron documentados en el trabajo de Braithwaite (1854) quien empleó el término fatiga exclusivamente para denotar la figuración de metales bajo la acción de cargas repetidas.

Whöler entre 1852 y 1869 en Berlín, estableció un laboratorio experimental donde observó que la resistencia de los ejes de ferrocarriles sujetos a cargas cíclicas eran apreciablemente menores que sus resistencias estáticas. Dichos experimentos involucraron flexión, torsión y cargas axiales sobre ejes a escala real para la Prussian Railway Service. El gran aporte de Whöler a la ingeniería consistió en la caracterización del comportamiento a fatiga de los metales con los gráficos en términos de amplitud del esfuerzo versus la vida (Figura 3), con la máquina de flexión rotativa, que hasta hoy día es ampliamente utilizada para someter metales a esfuerzos cíclicos. (Suresh, 1998). De la curva de Whöler se determinó la siguiente relación matemática:

$$\sigma = A \cdot N^{\gamma} \quad (\text{Ecuación 1.16})$$

Donde A es un coeficiente de la mezcla considerada que depende de la frecuencia de sollicitación y la temperatura a la cual es efectuado el ensayo, N es el número de ciclos,  $\gamma$  es un coeficiente empírico y  $\sigma$  es el esfuerzo a tracción máximo antes de la falla.

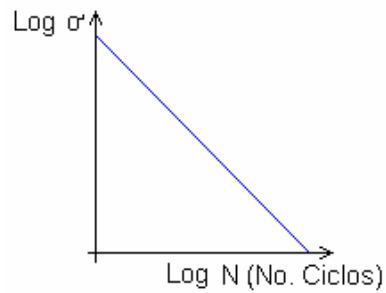


Figura 3 Curva de Wohler

En 1910, O.H. Basquin propuso leyes empíricas para caracterizar las curvas de esfuerzo versus vida de algunos metales, las cuales al estar en una escala doblemente logarítmica tenían un comportamiento lineal para un gran rango de esfuerzos.

### 1.2.2 Fatiga en Materiales Tratados con Ligantes Hidráulicos

Los ensayos de laboratorio hechos sobre los materiales tratados con ligantes hidráulicos consisten en someter probetas fabricadas según un proceso normalizado a esfuerzos también normalizados y medir las deformaciones asociadas a estos esfuerzos y los que producen la ruptura.

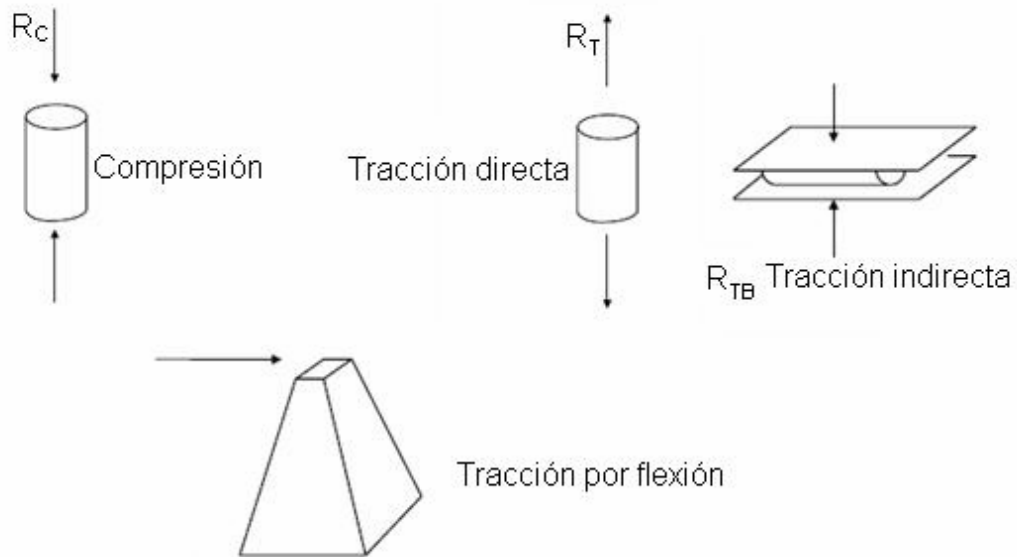


Figura 4 Ensayos para los materiales tratados con Ligantes Hidráulicos

- Ensayos de tracción directa: el esfuerzo de tracción está directamente ejercido sobre las dos caras planas de una probeta cilíndrica, se nota que  $R_T$  es la resistencia a la tracción así obtenida.

- Ensayo de tracción indirecta (ensayo de compresión diametral o ensayo Brasiler): el esfuerzo de tracción es obtenido rompiendo una probeta cilíndrica entre dos planos paralelos. Los esfuerzos son ejercidos según dos generatrices diametralmente opuestas, se nota RTB.
- Ensayo de tracción por flexión: diversos procesos conducen a ejercer un esfuerzo de tracción por flexión. Se ha estandarizado este ensayo; que consiste en aplicar un esfuerzo en la cabeza de una probeta empotrada en la base. El ensayo de flexión por 3 puntos es utilizado para estudiar el concreto de cemento.

Los ensayos de fatiga son efectuados en flexión sobre probetas prismáticas trapezoidales, repitiendo en cada una de ellas la aplicación de un nivel de esfuerzo preestablecido, hasta la ruptura de las probetas.

Se deduce la curva de fatiga que correlaciona el esfuerzo  $s$  con el número de ciclos a la ruptura  $N$ . Para los materiales tratados con ligantes hidráulicos la curva de fatiga se presenta muy definida.

### **1.2.3 Fatiga en Materiales Asfálticos**

Estos materiales presentan la particularidad que para un nivel de esfuerzo fijo, la deformación depende del tiempo. La analogía mecánica de un sólido elástico hace que intervengan una serie de resortes; se toma para ello un modelo de Kelvin – Voigt.

Se dice que el comportamiento de estos materiales es viscoelástico. Esta propiedad se explica por la dependencia del módulo con la frecuencia de aplicación de la carga: el módulo es elevado cuando el material es sometido a una sollicitación rápida (cuando la calzada sufre el paso del vehículo que circula a una velocidad normal (60 km/h). El módulo es bajo cuando el material es sometido a una sollicitación lenta (vehículos rodando a velocidades muy bajas o estacionadas). La segunda variable que influye sobre el módulo de un material bituminoso es la temperatura, donde con altas temperaturas el módulo disminuye. Los otros parámetros que influyen sobre un concreto asfáltico son su composición, su compactación y la naturaleza del asfalto.

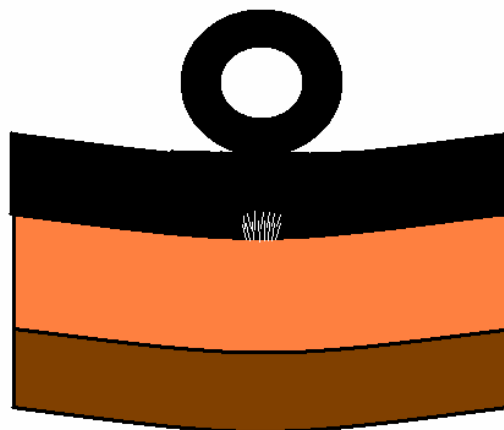
Existen diversos tipos de ensayos de fatiga, siendo algunos de los más conocidos en el ámbito mundial detallados en capítulos posteriores de este proyecto.

## CAPÍTULO II

### FATIGA EN PAVIMENTOS

Estudiosos del tema concluyen que la falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga.

Actualmente, se ha determinado que gran parte del daño de las estructuras de pavimento es generada por el efecto de fatiga de la mezcla asfáltica (materiales), y que las fallas por fatiga inician en la parte inferior de la capa y se va prolongando hasta la superficie. El modelo tradicional de fatiga de pavimentos se muestra en la Figura 5, el cual es determinado en la capa asfáltica como una tensión máxima en las fibras inferiores de la capa, la cual debido a los esfuerzos soportados se va degradando y prolongando hacia arriba, finalizando en unas fallas estructurales en la obra.



*Figura 5 Modelo tradicional de fatiga en mezclas asfálticas*

Los ensayos experimentales para determinar la fatiga se pueden realizar de diferentes modos, uno de ellos es a esfuerzo controlado, el cual es someter una probeta a ciclos de carga con amplitud de esfuerzo constante (Figura 6). La deformación aumenta lentamente según la duración del ensayo y toma una forma exponencial para los últimos ciclos precedentes a la falla. La duración de la vida del material es determinada por la deformación relativa.

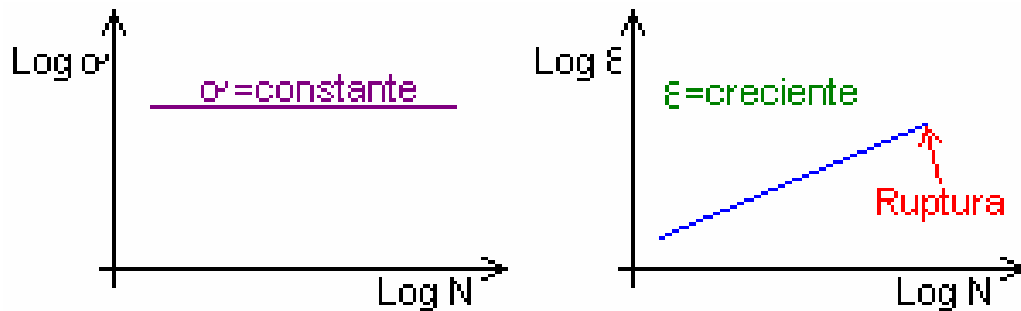


Figura 6 Curva de Wöhler por esfuerzo controlado

Otro modo de determinar las leyes de fatiga es por deformación controlada (Figura 7), la cual consiste en someter la muestra a ciclos de carga con deformación constante y se determina el esfuerzo, el cual varía con el tiempo (ciclos de carga). El esfuerzo que soporta el material disminuye en la medida que el ensayo progresa y su módulo decrece.

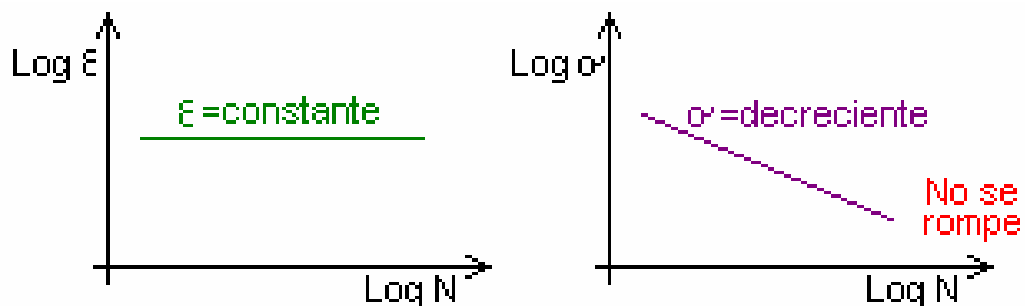


Figura 7 Curva de Wöhler por Deformación Controlada

## 2.1 MÉTODOS DE PRUEBA DE FATIGA

Un ensayo ideal sería aquel que fuera capaz de inducir un estado tensional similar al que se produce en la realidad; Kerkhoven y Dormon (1953) esquematizan en la figura 8 el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento, en donde distinguieron cuatro casos:

1. Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda.
2. Tracción longitudinal y transversal combinada con compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa bajo la rueda.
3. Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
4. Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.

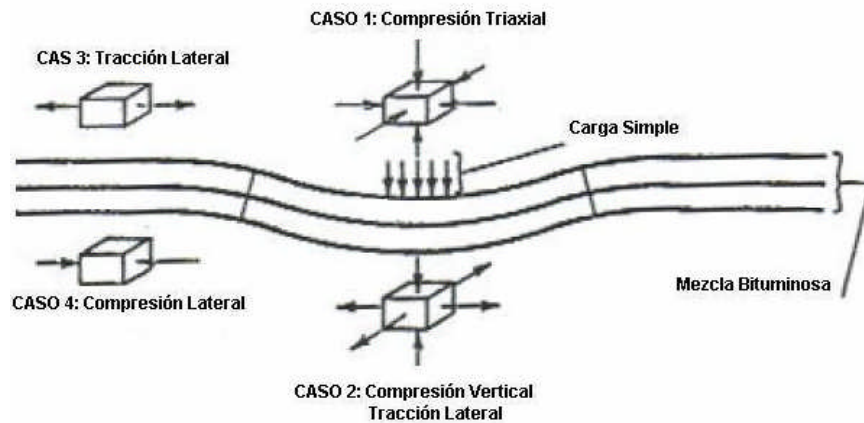


Figura 8 Estado tensional en un pavimento bajo carga simple

Existen ensayos que representan cada uno de estos estados tensionales, pero no hay ninguno que represente los cuatro a la vez. Sin embargo, algunos investigadores llegaron a la conclusión que no es necesario representar los cuatro casos anteriormente mencionados, debido a que la experiencia determina que la zona mas critica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa bajo la carga aplicada.

Roque, Buttlar, (1994) afirma que el comportamiento de las mezclas bituminosas es no-lineal, inelástico y depende del tiempo, también que generalmente se acepta un análisis multicapa elástico lineal que proporciona datos razonables de la respuesta del firme a temperaturas inferiores a los 25 °C.

En este capítulo se realizará un análisis detallado de los métodos más conocidos para el estudio de la fatiga en la falla de la estructura de los pavimentos. La figura 9 muestra diferentes métodos desarrollados:

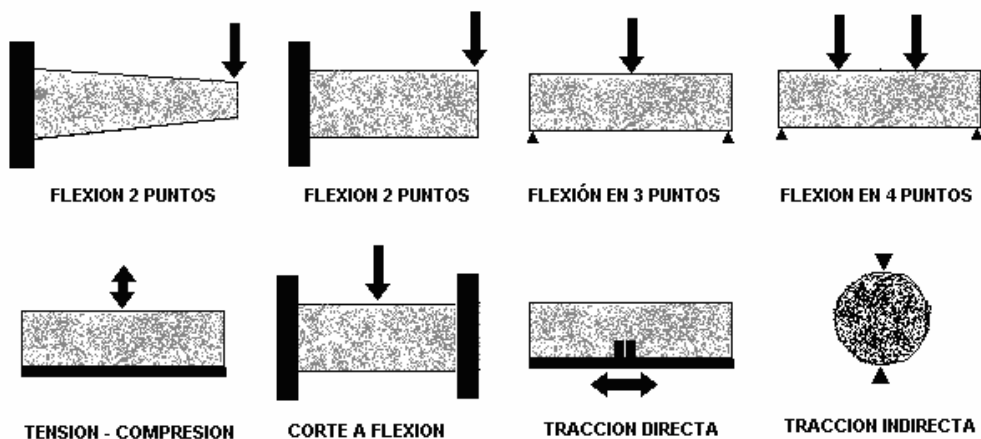


Figura 9 Diferentes pruebas de laboratorio para caracterizar la fatiga

### 2.1.1 Flexión Simple

Según la SHRP A – 312; las pruebas simples de flexión han desarrollado la mayoría de los datos de prueba de fatiga, ya sea con esfuerzo o deformación controlada, bajo cargas repetitivas aplicadas hasta que la muestra falle o exhiba cambios en sus características que hicieron la mezcla inadecuada.

Los resultados de estas pruebas se han expresado bajo la forma de ecuaciones siguientes (e.g., Pell, 1967; Monismith et al., 1966, 1981; y Pell et al., 1975).

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^b \quad \text{o} \quad N_f = c \left(\frac{1}{\sigma_r}\right)^d \quad (\text{Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2})$$

donde  $\epsilon_r$  y  $\sigma_r$ , son las magnitudes de deformación y esfuerzo con repeticiones de cargas aplicadas; a, b, c, y d son coeficientes materiales asociados a la metodología del prueba de laboratorio; y  $N_f$  es el número de los aplicaciones de carga para que ocurra la falla.

#### 2.1.1.1 Modos de Prueba

##### a) Ensayo de fatiga por Flexión en dos puntos:

Las pruebas en muestras trapezoidales han sido conducidas por los investigadores de Shell (Van Dijk, 1975), los investigadores de Bélgica (Verstraeten, 1972, y Verstraeten et al., 1961), y por el LCPC (Bonnot, 1986).

La dimensión más grande del espécimen trapezoidal se fija y el extremo más pequeño se somete a la aplicación de una deformación sinusoidal (Bonnot, 1986; Van Dijk, 1975; y Verstraeten, 1972) o esfuerzo (Kunst, 1989).

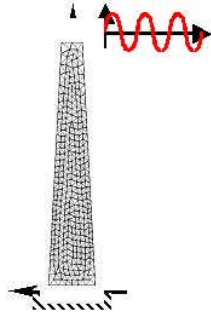
Las pruebas realizadas por los investigadores antes mencionados, coinciden que seleccionando correctamente las dimensiones de la muestra trapezoidal, los especímenes fallarán aproximadamente a media altura donde se aplica la mayor tensión de flexión. Los especímenes probados por Van Dijk, por ejemplo, tenían una sección de base de 55 milímetros por 20 milímetros, y una sección superior de 20 milímetros por 20 milímetros, con una altura de 250 milímetros.



Figura 10 Máquina para prueba trapezoidal

Este tipo de ensayo, con flexión en dos puntos, es empleado en Francia y la denominan a flexo tracción en dos puntos, con desplazamiento controlado y con muestras trapezoidales. La temperatura del ensayo es normalmente obtenido a 10°C y a una frecuencia de 25Hz. A continuación se describe el procedimiento del ensayo:

Se obtienen de campo o se construyen las muestras trapezoidales, cuyas dimensiones son de 25 centímetros de altura, por 2.5 centímetros de ancho y con una base menor de 2.5 centímetros y una base mayor de 7.5 centímetros, tal como aparece en la figura 11. A continuación se pega o empotra la muestra del lado de la base mayor y en su base menor se aplica un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante. Se debe registrar la fuerza que necesaria para aplicar dicho desplazamiento. La fuerza inicial de los primeros ciclos se denomina  $P_0$ , la cual sirve para calcular la finalización del ensayo, que corresponde cuando la fuerza  $P$ , llegue a la mitad del valor inicial, es decir,  $P_0/2$ .



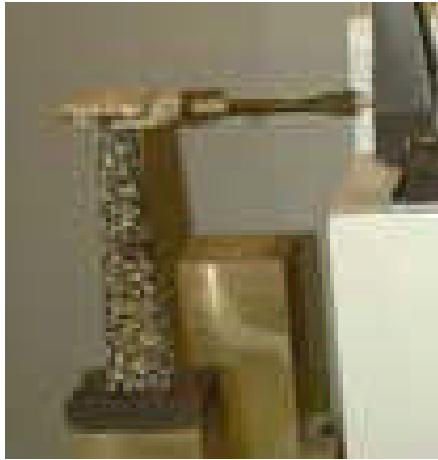
*Figura 11 Ensayo a flexión en muestras trapezoidales y contacto en dos puntos.*

El equipo utilizado normalmente en este ensayo es la Máquina de flexión (Marsac, 1992):

Este dispositivo de flexión alternada sobre probeta trapezoidal permite llevar dos tipos de prueba: uno de medida de módulo compleja, otro de fatiga. La probeta trapezoidal se ajusta según el plan presentado adjunto en un bloque de revestimiento fabricado en laboratorio. Sus dimensiones son las siguientes:

Base mayor: 56 mm. o 70 mm.  
Base menor: 25 mm.  
Grosor: 25 mm.  
Altura: 250 mm.

El instigador es un vástago vibrante electrodinámico que permite aplicar una carga sinusoidal de frecuencia y amplitud dadas en cabeza de la probeta trapezoidal, como se muestra en la figura 12:



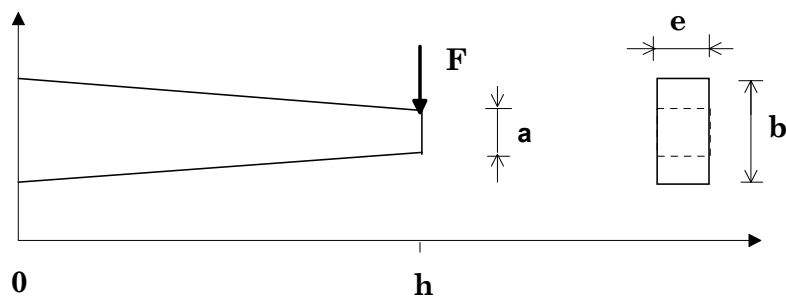
*Figura 12 Principio de la prueba de flexión sobre probeta trapezoidal*

El conjunto del sistema, probeta + instigador se coloca en un recinto termo - regulado que permite mantener la temperatura, a algunos centímetros de la probeta, constante cerca a  $0,2^{\circ}\text{C}$  durante la prueba.

El desplazamiento  $d$  y la fuerza  $F$  en cabeza de la probeta se miden con ayuda de captadores:

- un captador de desplazamiento inductivo Phillips cuyo cuerpo se fija en un soporte rígido y cuyo núcleo sigue los movimientos de la extremidad de la probeta.
- un captador de fuerza piezoeléctrico Kiesler, situado entre el vibrador y el casco superior de la probeta, asociado a un amplificador de carga.

Los valores de esfuerzo y deformación máximos  $\sigma_{max}$  y  $\varepsilon_{max}$  sufridos por la probeta se calculan entonces a partir de las características geométricas de las probetas figura 13, con ayuda de las fórmulas resultantes de un cálculo clásico de resistencia de los materiales.



*Figura 13 Características geométricas de las probetas trapezoidales*

Se procede a calcular:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{(b-a)^2}{8h^2 a \left( \ln \frac{b}{a} - \frac{(b-a)(3b-a)}{2b^2} \right)} \cdot d \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$\text{y} \quad \sigma_{\max} = \frac{3h}{2ea(b-a)} \cdot F \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Las pruebas habitualmente se realizan por las siguientes temperaturas y frecuencias: -10; 0; 10; 20; 30 y 40 °C, y 1; 3; 10; 25; 30 y 40 Hz.

La prueba de fatiga en laboratorio permite determinar la deformación  $\varepsilon_6$  que conduce a la ruptura de una probeta por fatiga bajo algunas condiciones de prueba (frecuencia, temperatura) para  $10^6$  cargas.

Se calcula una deformación admisible  $\varepsilon_{\text{adm}}$  a partir de este valor de  $\varepsilon_6$ , tiene en cuenta el desfase existente entre las condiciones de pruebas de laboratorio y la realidad (carga, temperatura.) a través de una serie de coeficientes correctivos. Este valor  $\varepsilon_{\text{adm}}$  se compara a continuación a los valores calculados con ayuda del modelo.

La dimensión de las capas bituminosas se da por correcto cuando  $\varepsilon_{\text{calculado}} < \varepsilon_{\text{admisible}}$  en cada capa, si no, es necesario aumentar los grosores o reconsiderar los materiales elegidos.

Ensayo Torsional:

En la universidad de Nottingham, Reino Unido (Pell et al., 1975 y 1973), utilizaron una máquina con rotación en la cual la muestra se monta verticalmente en un eje voladizo que rota, aplicando una carga en la parte superior e induciendo un esfuerzo con amplitud constante, la mayoría de las pruebas con temperatura de 10°C y una velocidad de 1.000 RPM. El módulo de rigidez dinámico se encontró a través de otra máquina, aplicando deformaciones sinusoidales con amplitud constante. Pell también utilizó una máquina torsional con deformación controlada para algunas pruebas de fatiga en materiales bituminosos.

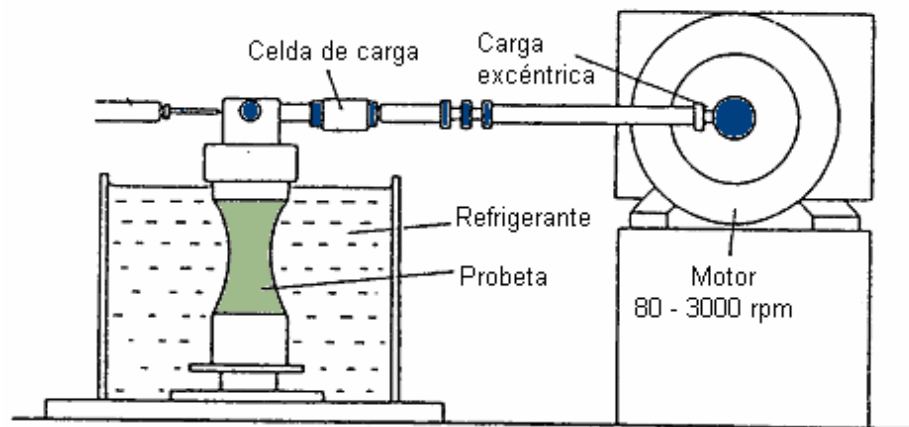


Figura 14 Máquina Torsional

*b) Ensayo con carga en el punto central o en tres puntos:*

Para los ensayos de fatiga, la universidad de California en Berkeley usualmente utiliza una muestra, viga, simplemente apoyada, que se somete a carga con esfuerzo o deformación controlada bajo carga en tres puntos o en el punto medio. Las dimensiones de las muestras son de 1.5 pulg. x 1.5 pulg. x 15 pulg (38 x 38 x 381) mm; También el Instituto del Asfalto, utiliza muestras más grandes, 3 pulg. x 3 pulg. x 15 pulg (76 x 76 x 381) mm. Las cargas se aplican en dos localizaciones para asegurar un momento de flexión uniforme a través de la viga. Con el equipo utilizado para este ensayo, puede también aplicarse cargas sinusoidales, teniendo un tiempo de carga de 0.1 seg y una frecuencia de 100 repeticiones por minuto.

El laboratorio de Shell en Amsterdam ha utilizado también un equipo de carga en el punto medio. Las dimensiones del espécimen son 1.2 in x 1.6 in x 9.2 in (30 x 40 x 230) mm, bajo deformación controlada.

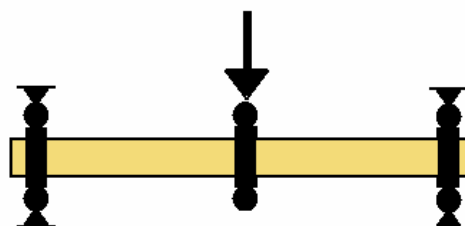


Figura 15 Flexión en tres puntos

*c) Ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos*

En este ensayo las normas para tener en cuenta en el diseño de la estructura y en la realización del ensayo son la norma europea EN 12697-24 y la norma Americana AASHTO TP8-94.

El objetivo al desarrollar este ensayo es determinar la resistencia a la fatiga de las mezclas extraídas de las secciones de capa asfáltica analizada o de muestras hechas en laboratorio. Los ciclos de aplicación de carga sobre la muestra hasta la falla obtenidos por este ensayo son usados para determinar la resistencia a la fatiga de las capas de pavimento asfáltico afectadas con cargas de tráfico real. Con el conocimiento de estos parámetros se puede optimizar el comportamiento de las mezclas asfálticas.

El ensayo consta básicamente de un aparato de carga, una cámara ambiental y un sistema de adquisición de datos; el sistema de carga debe tener la capacidad de proveer carga sinusoidal repetida con un rango de 0 a 10 Hz. La muestra debe ir sujeta de tal forma que tenga cuatro puntos de apoyo, los cuales tienen libre translación, libre rotación y mantienen a la muestra en su posición original. La cámara ambiental debe mantener la muestra a una temperatura de 20°C. El sistema de adquisición de datos debe tener la capacidad de medir las deflexiones de la viga y las cargas aplicadas por el aparato en cada ciclo; además, debe grabar los ciclos de carga y compilar los datos. La muestra se apoya en 4 puntos, recibe la carga en los dos puntos centrales (figura 16) y en los otros dos hay una restricción vertical del movimiento lo que hace que la muestra presente flexión.

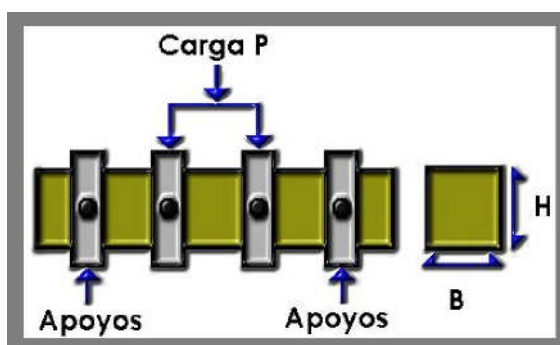


Figura 16 Apoyo en 4 puntos y distribución de carga

El ensayo comienza desde la toma de muestras en campo o muestras elaboradas en probetas-molde del laboratorio. Las muestras se montan en la estructura y luego se procede a calibrar el cero de las celdas de carga. Se realiza la lectura de la amplitud de fuerza de la celda a través de la variación de carga dada por el pistón y captada en el LVDT. Posteriormente, se toman lecturas a diferentes periodos de tiempo determinados hasta el momento en que falle la muestra prismática. El punto de falla es aquel en el cual la amplitud de la fuerza sobre la muestra es menor o igual al 50% de la lectura inicial.

El ensayo se desarrolló en Estados Unidos de América, en 1987, con la SHRP (Starategic Highway Research Program), quien empezó a desarrollar un nuevo sistema de especificaciones para los materiales asfálticos, dentro de sus especificaciones se determinó el ensayo a fatiga por flexión en cuatro puntos a deformación controlada.

Lo importante del desarrollo de este equipo es la posibilidad de realizar también ensayos a esfuerzo controlado.

Para la norma americana (AASHTO) la exigencia de una cámara de temperatura es opcional, limitando el control de temperatura del ensayo, ya que se debe realizar a 20 °C.

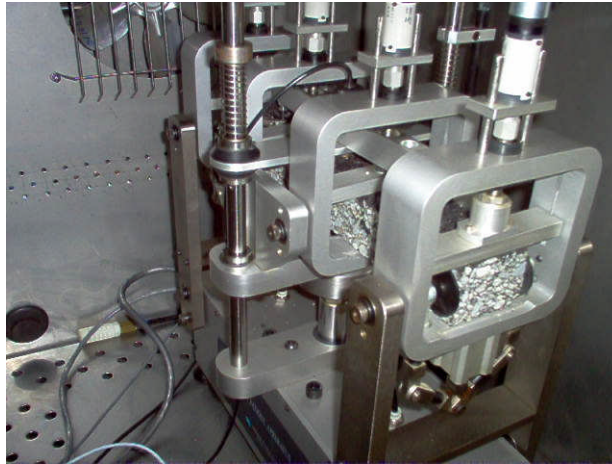


Figura 17 Ensayo de fatiga de la SHRP en cuatro puntos

Características más importantes del ensayo

- Protocolo de ensayo: AASHTO TP-8 o ASTM D 4123
- Carga en 4 puntos
- Carga sinusoidal o haversiana a 10 Hz
- Temperatura de ensayo: 20 °C
- Especímenes de 50 mm X 62.5 mm X 375 mm
- El protocolo de ensayo AASHTO TP-8, señala la realización de un condicionamiento del espécimen de 2 horas, a 20 °C.

Los resultados de esos ensayos serán utilizados para generar la relación de deformación versus ciclos de carga:

$$N = A + B * \varepsilon \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde

N = Ciclos para la falla  
A = intersección de la línea de regresión  
B = pendiente de la línea de regresión, y  
 $\varepsilon$  = esfuerzo aplicado

- Esta relación es utilizada para estimar la deformación que se requiere para tener una vida de fatiga aproximada entre 100000 y 350000 ciclos.
- Se deben hacer dos ensayos adicionales, uno a 100000 ciclos y el otro a 350000 ciclos de carga.
- Para cada uno de los ensayos se calcula la rigidez, los esfuerzos aplicados, las deformaciones y la energía disipada.

El esfuerzo aplicado pico a pico es:

En donde:

$$\sigma_t = \frac{3aP}{wh^2} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

$\sigma_t$  = Máximo esfuerzo  
tensión, N

$a$  =  $L/3$ , mm

$L$  = luz de la viga, mm

$P$  = carga aplicada, N

$W$  = ancho de la viga, mm

$h$  = altura de la viga, mm

de

La deformación es:

$$\varepsilon_t = \frac{12h\delta}{3L^2 - 4a^2} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde

$\varepsilon_t$  = deformación máxima, mm/mm

$\delta$  = deflexión de la viga en el eje neutral, mm

Rigidez:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde

$S$  es la rigidez de la viga en Pascales.

El ángulo de fase es:

$$\phi = 300 f * s \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

En donde

$\phi$  = ángulo de fase

$f$  = frecuencia de la carga, Hz

$s$  = Tiempo de espera entre  $P_{\text{máx}}$  y  $\delta_{\text{máx}}$ , s.

La energía disipada por cada ciclo se define como:

$$D = \pi \sigma_t \varepsilon_t \text{sen} \phi \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

En donde

D es la energía disipada por ciclo en Pascales.

La energía disipada acumulada es la determinada por la suma de la energía disipada por ciclo en la vida del espécimen.

Finalmente, el módulo de elasticidad (MPa), es el siguiente:

$$E = \left[ \frac{Pa}{\delta wh} \right] x \left[ \frac{(3L^2 - 4a^2)}{4h^2} + k * (1 + \nu) \right] \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

En donde:

P = Fuerza pico

a = L/3, mm

$\delta$  = Deflexión pico al centro de la viga

w = Ancho de la viga

h = Altura de la viga

L = Luz de la viga

k = Esfuerzo cortante actual dividido por el esfuerzo cortante promedio (Se asume 1.5)

$\nu$  = relación de poisson por defecto

#### Procedimiento de ensayo

El procedimiento emplea cuatro especímenes evaluados a cuatro diferentes niveles de deformación para determinar las propiedades de resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica. Los niveles de deformación son señalados dentro de los períodos de vida típicos para una mezcla, entre 5000 y 1-2 millones de ciclos, dependiendo, por supuesto, de la deformación unitaria o esfuerzo aplicado. Si el ensayo es desarrollado en el modo de esfuerzo controlado a una frecuencia de 10 Hz, el procedimiento es como se indica:

- Realice un ensayo al cual la vida del espécimen está entre 5000 y 10000 ciclos, los rangos recomendados de deformación estarán entre 800 y 1000  $\mu$ S.
- Si el primer ensayo indica una vida de fatiga mayor de 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser incrementado para el segundo ensayo. Si la vida a fatiga del primer ensayo es menor que 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser reducido para el segundo ensayo.

### 2.1.1.2 Ventajas y limitaciones

#### a) *Ventajas:*

1. Este método de prueba es bien conocido y entendido fácilmente.
2. Es una técnica básica fundamental que se pueda utilizar para la evaluación y el diseño de la mezcla.
3. Los resultados se pueden utilizar directamente (con un factor apropiado de conversión) en el diseño estructural de pavimentos para estimar la propensión para el agrietamiento.
4. Los resultados con esfuerzo controlado de la prueba se pueden utilizar para el diseño de los pavimentos asfálticos de capa gruesa mientras que los resultados de la prueba de la deformación controlada se pueden utilizar para el diseño de los pavimentos con capas finas de asfalto.
5. En el ensayo con carga en tres puntos, la falla del espécimen se inicia en una región de esfuerzo relativamente uniforme. Esta característica ayuda a reducir el coeficiente de variación en los resultados de la prueba, requiriendo pocas muestras.

#### b) *Limitaciones:*

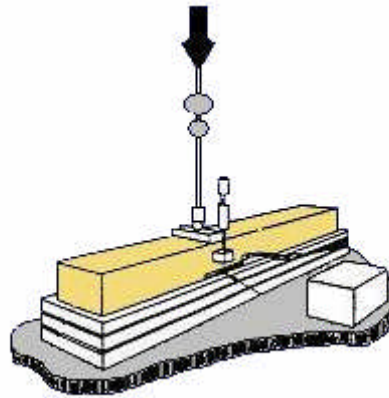
1. La validación de los resultados del laboratorio comparados con el funcionamiento "in-situ" del pavimento es difícil debido a la necesidad de a un factor de conversión.
2. El método es costoso, requiere de mucho tiempo, y de un equipo especializado.
3. No simula el interior de la estructura del pavimento, el estado del esfuerzo es esencialmente uniaxial.
4. Se asume la teoría elástica para encontrar el esfuerzo o la deformación.

### 2.1.2 Flexión apoyada

Para acercarse más a las condiciones "in-situ" de esfuerzo y modo de carga, diferentes investigadores han utilizado especímenes circulares de losa apoyados en una estera de goma (Majidzadeh et al., 1971) o un amortiguador de aire (Jimenez et al., 1962). Aplicando una carga repetida en forma circular en el centro de la losa dando por resultado un estado de esfuerzos en la losa que es muy similar al ocurrido en la estructura del pavimento.

Estas pruebas de fatiga fueron utilizadas por Barksdale (1977) para evaluar las características de la fatiga de bases de concreto asfáltico. En su metodología, las vigas de concreto asfáltico fueron puestas en una estera de goma para simular las condiciones de ayuda de campo. El equipo de prueba de la fatiga consistió en un marco de carga, una estera de goma gruesa de 4 pulg. (102 mm), un módulo de reacción del subsuelo de 284 Psi, para apoyo de la viga, y un sistema neumático de carga. La temperatura se mantuvo en 80°F +/- 1 °F (27°C). Los especímenes de la viga no se sometieron a revocaciones de

esfuerzo durante la prueba. El pulso de la carga tenía una duración de 0.06 segundos con aproximadamente una forma haversine de frecuencia, 45 CPM.



*Figura 18 Flexión Apoyada*

#### 2.1.2.1 Ventajas y limitaciones

##### a) *Ventajas:*

1. Es posible una mejor simulación de las condiciones del campo.
2. La prueba ofrece medios convenientes para examinar modos de carga entre los extremos del esfuerzo controlado y deformación controlada.
3. En temperaturas más altas, se supera el problema de la muestra de deformación debido a su peso.
4. Se espera que la ayuda del espécimen reduzca los efectos de imperfecciones de menor importancia en las muestras y, por lo tanto, reduzca la dispersión de los resultados de la prueba.

##### b) *Limitaciones*

1. Para los especímenes de viga, el estado de esfuerzo predominantemente es uniaxial, y, dependiendo de cómo el espécimen “se afianza con la abrazadera” al aparato de la prueba, él no se puede sujetar a las revocaciones de la tensión (Barksdale, 1977).
2. Es la prueba de fatiga, con mayor duración.
3. Comparado a la flexión simple, el equipo de prueba es más costoso y más complejo.

### 2.1.3 Axial directo

#### 2.1.3.1 Modos de Prueba

##### *a) Ensayo de tensión Uniaxial:*

El laboratorio del transporte y de investigación del camino (TRRL) del Reino Unido ha realizado pruebas uniaxiales sin anulación del esfuerzo usando una frecuencia de carga de 25 hertzios; una duración de 40 milisegundos; y periodos de descanso que varían a partir de 0 a 1 seg. Según Raithby (1972), a partir de periodos de descanso muy cortos, la vida de la fatiga aumenta rápidamente con un aumento en periodo de descanso antes de alcanzar un valor límite aproximadamente 0.4 segundos, más allá de las cuales el aumento de la duración del periodo de descanso tiene un efecto posterior muy pequeño. Estas pruebas fueron realizadas con esfuerzo controlado.

Más recientemente, las pruebas uniaxiales se han realizado en los Países Bajos (Kunst, 1989) con frecuencias de 1 y 0.1 hertzios usando un carga con ondas haversine con deformación controlada. Desafortunadamente, los detalles de las pruebas holandesas son inasequibles actualmente.

Ventajas:

1. Los especímenes pueden tener secciones circulares o rectangulares.
2. Los resultados se pueden utilizar para evaluar mezclas y para diseñar el pavimento para resistencia a fatiga, mientras los factores de campo sean apropiados y representen las condiciones in situ.
3. Comparada con las pruebas por flexión, éstas son más simples y menos costosas.
4. El tiempo es más corto porque pocos ciclos del carga se pueden sostener antes de fallar.
5. El esfuerzo y la deformación se pueden determinar fácilmente y en el caso de la deformación, esta es medida directamente.

Desventajas:

1. La condición de carga no representa necesariamente las condiciones del campo.

##### *b) Ensayos de tensión/compresión:*

En esta prueba de fatiga desarrollada en el TRRL (Raithby, 1972), la carga axial y compresiva se aplica por medio de una máquina electro-hidráulica.

Los especímenes son prismas, con secciones cuadradas y longitudes de 225 milímetros, y 75 milímetros. Las frecuencias de carga son de 16.7 y 25 hertzios, y los efectos de los periodos de descanso, y onda y secuencia de carga son, compresión/tensión, tensión/compresión, solo compresión, y solo tensión.



*Figura 19 Ensayo de Tensión / Compresión*

Raithby concluyó:

1. Siendo cortos los periodos de descanso tienen un efecto importante en la vida de la fatiga.
2. Comparado con la carga cíclica continua en 25 hertzios, la vida a la falla con periodos de descanso de 1 segundo es hasta 25 veces más larga, el aumento de la vida depende en gran parte de la temperatura de la prueba. Sobre los 25 °C, aparece una disminución de impacto sobre los periodos de descanso cortos en la vida por fatiga.
3. El efecto de la forma de la carga (por ejemplo, sinusoidal, trapezoidal, y triangular) no es muy grande. Así, para las pruebas de laboratorio prácticos del concreto asfáltico, el pulso sinusoidal de carga parece una representación razonable.
4. De las cuatro secuencias de carga, la carga cíclica compresiva pura da una vida por fatiga más grande, seguido por la carga cíclica tensión/compresión, la carga cíclica de tensión, y la carga cíclica compresión/tensión. Entre la carga cíclica tensión/compresión y la carga cíclica compresión/tensión, la diferencia en la vida de la fatiga es cerca de 30%.

Ventajas:

1. Es posible simular el pulso de carga observado en el campo (compresión/tensión/compresión).
2. Los resultados se pueden utilizar para evaluar efectos de la mezcla y, con factores de correlación de campo, para diseñar los pavimentos con los que se pueda controlar el agrietamiento por fatiga.

Desventajas:

1. La prueba no representa condiciones de campo, con la excepción de la forma del pulso de carga.

2. Cuando se realizan pruebas de esfuerzo se requiere más tiempo, equipo especializado y son más costosas.

#### **2.1.4 Ensayo diametral**

Según lo consignado en la SHRP A-312 la prueba diametral de fatiga es una prueba de tracción indirecta conducida por un repetidor de carga sobre un espécimen cilíndrico con una carga compresiva paralela y a lo largo del plano diametral vertical. Esta configuración de carga desarrolla unos esfuerzos de tensión uniforme y perpendicular del espécimen a la dirección de la carga aplicada y a lo largo del plano diametral vertical.

La prueba es simple y es considerada por algunos como un método eficaz para caracterizar los materiales en términos de características "fundamentales". Un número de investigadores han utilizado esta prueba para las evaluaciones y los análisis del pavimento (Kennedy et al., 1983 y 1968; Scholz, Hicks et al., 1989; Khosla y Omer, 1985; Schmidt, 1971; etc.).

El equipo utilizado posee una configuración de carga relativamente simple, las cargas se pueden aplicar con varios dispositivos incluyendo sistemas electro-hidráulicos y neumáticos. El pulso de carga haversine es empleado generalmente. Kennedy y Anagnos (1983) utilizaron una rata de carga de 0.4 segundos y un intervalo de descanso de 0.6 segundos (60 repeticiones por minuto). Khosla y Omer (1985) utilizaron una rata de carga de 0.05 segundos y una frecuencia de 20 repeticiones por minuto. Los especímenes de la prueba tienen generalmente 4 pulg. de diámetro y 2.5 pulg. de alto. La carga se transmite a los lados del cilindro circular derecho a través de tiras anchas de carga de 0.5 pulg.

El ensayo a tracción indirecta de probetas confeccionadas con mezclas asfálticas se basa principalmente en las siguientes normas internacionales:

- Norma AASHTO: especificación TP9 de 94.
- Norma ASTM : especificación C496, D4123, D3497.
- Norma de ensayo NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas".
- Norma NLT-159/86 para la descripción de la prensa utilizada para el ensayo Marshall.

El ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica, igual a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas figura 20. Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral, figura 21.

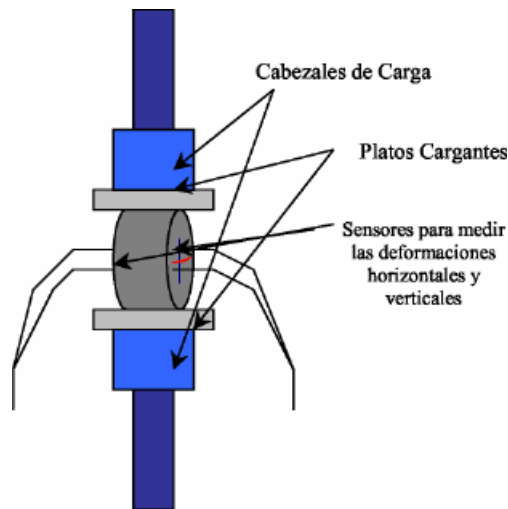


Figura 20 Esquema de probeta bajo Tracción Indirecta

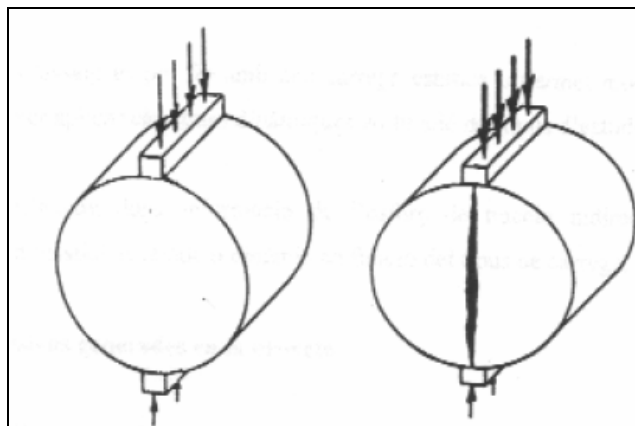
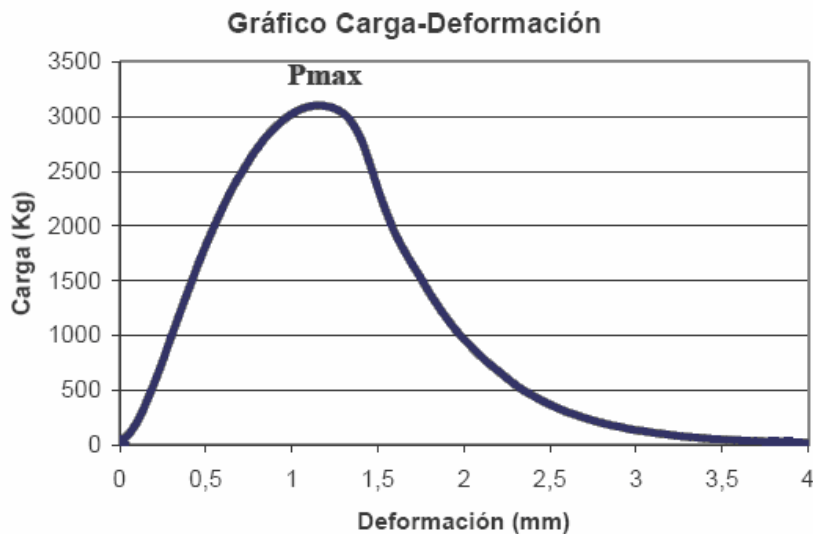


Figura 21 Configuración de la carga y rotura del ensayo de tracción indirecta, Kennedy

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta, figura 22; también se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los sistemas necesarios para medirlos. El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para las extraídas del pavimento.



*Figura 22 Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta*

Hasta 1965 de este ensayo solo se obtenía la resistencia a tracción indirecta, pero desde entonces hasta ahora se ha profundizado en el estudio debido a las ventajas que presenta el ensayo. Lo más obvio es la simplicidad de la metodología, y este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. El Departamento de Carreteras del Estado de Texas impulso unos estudios dirigidos por Thomas Kennedy de la Universidad de Austin en los cuales presento las ventajas básicas del ensayo:

- El ensayo es relativamente sencillo.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otros ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere (1990) en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 15 %.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática y permite modificar la prensa para aplicar cargas dinámicas en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo da información sobre propiedades elásticas resilientes, de Fisuración térmica, de Fisuración por fatiga, de deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas.

La distribución teórica de tensiones según Hertz (1885), dadas en una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en el ensayo de tracción indirecta, a lo largo de los ejes horizontales y verticales para una carga concentrada se muestra en la figura 23:

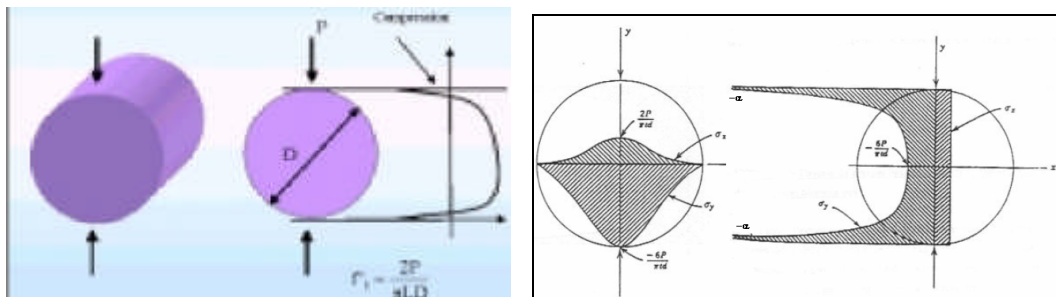


Figura 23 Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta

Las tensiones en el diámetro horizontal son las siguientes:

Tensión Horizontal:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \left[ \frac{4 \cdot d^2}{d^2 + 4 \cdot x^2} \right]^2 \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Tensión Vertical:

$$\sigma_y = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \left[ \frac{4 \cdot d^2}{d^2 + 4 \cdot x^2} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Tensiones tangenciales

$$\tau_{xy} = 0 \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Para el plano diametral vertical (a lo largo del eje de carga), las tensiones están dadas por las ecuaciones:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} = \text{constante} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

$$\sigma_y = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t} \left[ \frac{2}{d - 2 \cdot y} + \frac{2}{d + 2 \cdot y} - \frac{1}{d} \right] \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Donde:

P es la carga total aplicada (N)

t es la altura de la probeta (mm ± 0,1 mm)

d es el diámetro de la probeta (mm ± 0,1 mm)

x,y son las coordenadas respecto al centro de la probeta

Las ecuaciones descritas son las presentadas por M.Frocht para un sólido elástico ideal. Para la mayoría de los materiales de ingeniería, y en particular para el caso de las mezclas bituminosas, el fallo inicial se produce por rotura a tracción de acuerdo a la ecuación 2.15. Por lo tanto la resistencia a tracción  $S_t$  del material esta dada por:

$$S_t = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot d} \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

De acuerdo a estas condiciones de carga lineal, algunos investigadores expresan que la muestra fallaría alrededor de los puntos de carga debido a tensiones de compresión y no en la porción central de las muestras debido a tensiones de tracción. No obstante, aseguran que estas tensiones de compresión se reducen considerablemente distribuyendo la carga a lo largo de una placa de carga, que no solo reduce las tensiones de compresión vertical, sino que cambia las tensiones horizontales a lo largo del diámetro vertical, de tracción a compresión cerca de los puntos de aplicación.

Según este ensayo para el estado biaxial de tensiones dentro de la muestra se desarrolla en su centro una tensión de compresión vertical que vale aproximadamente tres veces la tensión de tracción horizontal; se utiliza una placa de carga de apoyo curvo, de 12,7 o 25,4 mm de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del modulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de un ancho de carga variable durante el ensayo, que ocurriría con una placa de carga plana.

El ensayo está dirigido a probetas de mezcla asfáltica con diámetro de 102 mm y espesor entre 25 mm como mínimo y 51 mm como máximo. El espesor deseado es de 51 mm.



Figura 24. Visualización más cercana del ensayo de la probeta a Tracción Indirecta.

#### 2.1.4.1 Ventajas y limitaciones

##### a) Ventajas:

1. La prueba es de naturaleza simple.
2. El diseño de mezclas y de pavimentos para el soporte de la fatiga es posible en principio usando la respuesta de fatiga medida por la prueba aplicando la correlación de campo.
3. El equipo es aplicable para otras pruebas, por ejemplo, módulo resiliente y fuerza de tensión.
4. La falla se inicia en una región de esfuerzo relativamente uniforme. Sin embargo, según Porter y Kennedy (1975), la variable que gobierna es  $(\sigma_t - \sigma_c)$ . La región uniforme para esta variable es mucho más pequeña que la región uniforme para el  $\sigma_t$ .
5. Existe un estado biaxial de esfuerzo, siendo este posiblemente una representación mejor de las condiciones de campo.
6. Las pruebas se pueden realizar en especímenes del laboratorio y de campo.

##### b) Limitaciones:

1. Aunque un estado biaxial de la tensión existe en el centro del espécimen, es imposible variar el cociente de los componentes verticales y horizontales y, por lo tanto, extender el estado de la tensión en los puntos críticos dentro de un pavimento "in-situ".
2. Este método subestima perceptiblemente la vida de la fatiga si la tensión extensible principal se utiliza como el determinante de los daños. Aún cuando la diferencia de la tensión,  $\sigma_t - \sigma_c$ , se utiliza para predecir la vida de la fatiga, el método todavía subestima esta comparada con otros métodos de laboratorio.
3. Existe preocupación debido a la ausencia de la revocación de la tensión y la acumulación de la deformación permanente.

### 2.1.5 Ensayo Triaxial

Un equipo de prueba de fatiga fue desarrollado en la universidad de Nottingham (Pell y Brown, 1972, y Pell y Cooper, 1975). Para este ensayo en particular, los especímenes son de forma cilíndrica con un diámetro de 4 pulg. y una altura de muestra de 8 pulg. y se someten a esfuerzo axial variable y pulso sinusoidal. Este equipo se ha utilizado para la prueba de tensión-compresión con y sin confinamiento. Para acomodar la tensión, los casquillos de extremo se enlazan al espécimen que proporciona una longitud útil para la medida de la deformación vertical de 6 pulg.

Otro equipo triaxial en el cual las tensiones axiales y radiales fueron aplicadas independientemente se podría utilizar para las pruebas de tensión repetida triaxial. McLean (1974) desarrolló tal equipo en la universidad de California, Berkeley para estudiar el comportamiento por rotación de las mezclas de asfalto bajo combinaciones de tensión y compresión normales.

También en la universidad de California, Sousa (1987) desarrolló un equipo que es capaz de aplicar tensiones por torsión (repetida o constante) junto con esfuerzo radial usando los especímenes fabricados como cilindros huecos. Hasta la fecha, solamente se han conducido las pruebas (torsionales) de fatiga. Este equipo se puede desarrollar más a fondo para aplicarse a repeticiones de esfuerzo radiales pulsados a través del líquido dentro del cilindro hueco, así simular las condiciones necesarias incluyendo tensiones de esquileo (con la torsión) y tensiones verticales.

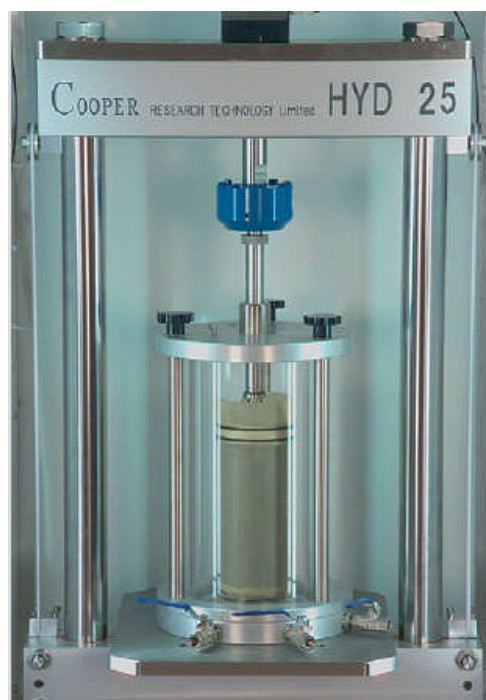


Figura 25 Máquina para ensayo triaxial

### 2.1.5.1 Ventajas y limitaciones

#### a) *Ventajas:*

1. Es posible simular la condición de carga del campo en la cual la compresión es seguida por la tensión.
2. Los resultados se pueden utilizar para el diseño de la mezcla con factores de correlación de campo, para el diseño estructural.
3. Es la prueba que mejor representa el estado de la tensión in situ comparada con la mayoría pruebas de laboratorio.

#### b) *Limitaciones:*

1. El esfuerzo debe ser controlado; si no, la vida predicha de fatiga puede ser considerablemente diferente que los resultados de campo.
2. Estas pruebas son costosas, requieren el equipo especializado, y tardan mucho tiempo.

### 2.1.6 Ensayos de propagación de la fractura

Otra caracterización de la respuesta de la fatiga hace uso de los principios de la mecánica de la fractura (Majidzadeh et al., 1971; Salam, 1971; y Monismith et al., 1973). En este método, la fatiga se considera en tres fases: (1) iniciación de la grieta, (2) crecimiento de grieta estable, y (3) propagación de grieta inestable.

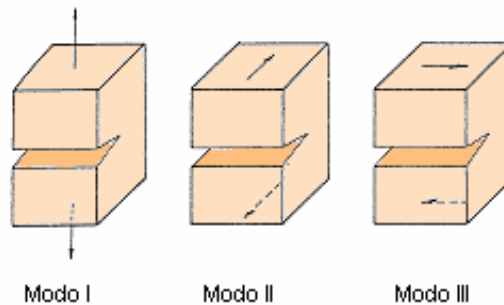


Figura 26 Modos de ensayo para ensayos de propagación de la fractura

Se asume que la segunda fase consume la mayor parte de la vida de la fatiga y, por lo tanto, es para esta fase que se han propuesto los modelos cuantitativos, basados en la mecánica de la fractura.

Una de las relaciones básicas usadas para esta fase es

$$\frac{da}{dN} = A(K_1)^n$$

(Ecuación 2.19)

Donde:

**a** es la longitud de la grieta,

**K1** es el factor de esfuerzo de orden  $1^6$  (esfuerzo por longitud  $1/2$ ),

**N** es el número de repeticiones de la carga, y

**A** y **n** son coeficientes experimentales.

Esta relación asume que el crecimiento de grieta estable ocurre entre una cierta longitud inicial de la grieta,  $a_0$ , y una longitud crítica,  $a_c$ , donde termina la vida por fatiga y se determina por  $K1c$ , el valor crítico de  $K1$ .

La metodología utilizada incluye las pruebas para fractura y fatiga; las pruebas de fractura divulgadas por Monismith y Salam (1973) y Salam y Monismith (1971) son de dos tipos:

1. Pruebas de flexión con muesca en un solo lado (1.5 x 2.0 x 15 pulgadas)
2. Pruebas de tensión con muesca en un solo lado (1.5 x 1.5 x 4.5 pulgadas)

El cociente entre la profundidad de la muesca y la dimensión de la viga esta en un radio de 0 a 0.4 en ambos tipos de pruebas. Inicialmente, la metodología para predecir la respuesta de la fatiga utiliza la técnica incremental.

Según Majidzadeh (1971), el tamaño de la zona plástica alrededor de una extremidad de la grieta es crítico en el análisis de la vida de la fatiga durante la fase de la propagación de grieta. En la zona plástica es menor comparada con el tamaño de la grieta; la fractura elástica lineal (LEFM) puede ser utilizada para aproximar las condiciones de la falla: si el tamaño de la zona plástica es varias órdenes de magnitud mayor que el tamaño de la fractura, es más apropiada la mecánica de la fractura no lineal, en el primer caso cuando se asume una fractura frágil, la intensidad del esfuerzo crítico **K1c**, define las características de la fractura del material. En el segundo caso, donde es mayor la zona no elástica, puede utilizarse la integral J, o la integral  $C^\circ$  para definir la propagación de grieta. Para este caso, una forma de modelo de propagación de grieta puede calcularse así:

$$\frac{dc}{dN} = A \left[ \frac{J}{(2 U_e)} \right] \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde:

**J** es el contorno del modo de la trayectoria independiente de la J-integral,

**c** es la longitud de la grieta,

**Ue** es la energía de deformación total,

**A** es una constante del material, y

**N** es el número de ciclos en la longitud "c" de la grieta.

Los pasos a seguir son:

1. Establecer una curva J-c experimental, donde  $U_e$  puede también ser encontrado.

2. Establecer una relación c-N, realizando pruebas de fatiga en especímenes con muescas.
  3. De esta relación obtener la relación de  $(dc/dN)$  contra N.
  4. Para un N dado, obtener c y  $dc/dN$ .
  5. Para un c dado, obtener  $J = 2 Uec$ .
  6. Establecer la relación  $dc/dN$ , la pendiente de esta relación debe ser  $A/2Ue$ .
- Los datos experimentales necesarios para calibrar este modelo de crecimiento de la grieta son considerables.

#### 2.1.6.1 Modo de prueba

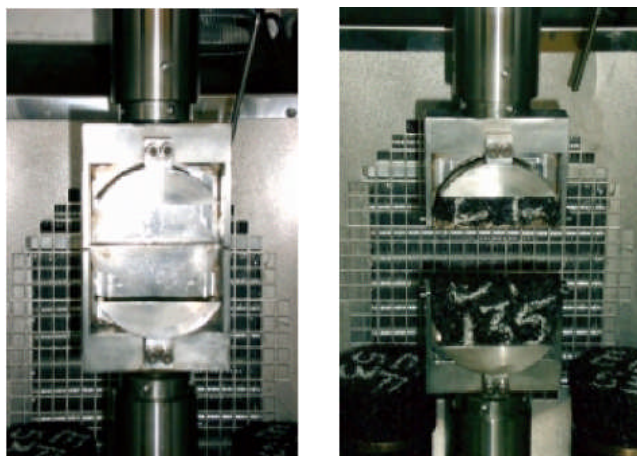
##### a) *Ensayo de fatiga por Tracción Directa*

El Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España 2001), ha desarrollado un procedimiento de ensayos que permiten estudiar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas y correlacionarlo con su tenacidad mediante la aplicación del Ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa).

Las pruebas que existen para simular la fatiga de una mezcla asfáltica requieren de equipos complejos para su ejecución. El ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa) desarrollado por el equipo profesional que dirige el Dr. Félix Pérez Jiménez tiene la ventaja que se puede aplicar en dos modos de prueba, uno estático (bastante simple y corto) y otro dinámico.

El Ensayo BTD se caracteriza por aplicar una combinación de fuerzas, de tal forma que somete a una probeta a un campo de esfuerzos a flexotracción, tratando de simular el deterioro por fatiga que sufren las mezclas asfálticas a partir de la propagación de una fisura desde su interfase con la base granular hasta su extremo superior (superficie del pavimento).

Para la realización del ensayo se utiliza un sistema conformado por un marco de carga, una consola que registra la temperatura de ensayo y el tipo de ensayo.



*Figura 27 Etapas del ensayo BTD (aplicación de la carga, y fin de la misma)*

El ensayo consiste en dos modos de prueba:

- Modo Estático a flexotracción con desplazamiento controlado y temperatura constante.
- Modo Dinámico a fatiga por flexotracción con esfuerzo controlado y temperatura constante.

#### Modo Estático

En este modo de ensayo se aplica un desplazamiento controlado a una velocidad fija de 1 mm/min., manteniendo la temperatura constante a 5°C, hasta llegar a la rotura total de la probeta. Se mide la carga y el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga.

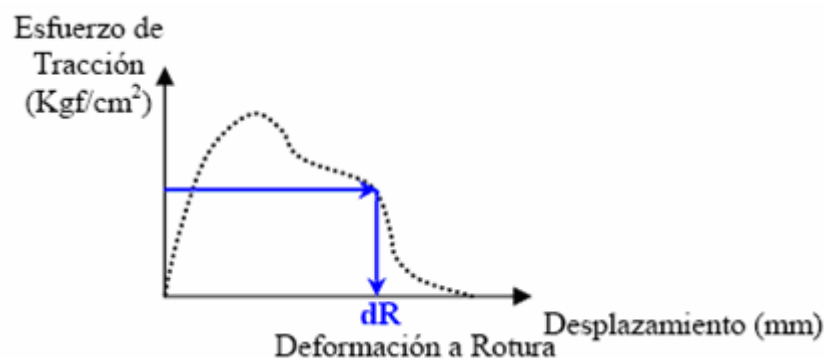


Figura N° 28 Curva de rotura que se obtiene del Modo Estático

Los parámetros se calculan siguiendo las siguientes ecuaciones:

Energía de Fractura:

$$G_f = \frac{\int_0^{\Delta_{\text{máx}}} P(\Delta) d\Delta}{(H \cdot D)} \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Donde:

**Gf** : Energía Específica de Fractura, en (Kgf-mm/cm<sup>2</sup>).

**P(Δ)**: Carga en función del Desplazamiento, en Kgf.

**dΔ** : Delta Desplazamiento aplicado a la probeta de ensayo, en mm.

**H** : Altura total del área resistente de la probeta, en cm.

**D** : Diámetro total de la probeta, en cm.

Resistencia Máxima a Tracción:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{H \cdot D} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

En que:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ :** resistencia máxima a tracción, en Kgf/cm<sup>2</sup>.
- $P_{m\acute{a}x}$ :** carga máxima lograda en el ensayo, en Kgf.
- H:** Altura total del área resistente de la probeta, en cm.
- D:** Diámetro total de la probeta, en cm.

La deformación a rotura (**dR**) en general corresponde al instante en que el esfuerzo máximo soportado por la probeta de ensayo se reduce a la mitad de su magnitud. Esta deformación se obtiene gráficamente a partir de la curva carga-deformación. Este caso corresponde a mezclas asfálticas con una falla de tipo frágil, en caso de falla con mayor ductilidad se deberá considerar una carga más próxima a cero para determinar la deformación de rotura.

b. Modo Dinámico.

En esta etapa, las probetas se someten a fatiga bajo una carga sinusoidal controlada de 10 Hz y una temperatura constante de 5°C. Se mide el número de ciclos de carga aplicados y las deformaciones en la fibra superior de la probeta mediante un extensómetro. La resistencia a fatiga de la mezcla se relaciona, mediante este ensayo, con la deformación unitaria en la fibra inferior de la probeta ( $\epsilon_i$ ), que es donde comienza la fisuración. El ensayo acaba cuando la fisura provocada por fatiga se propaga a todo el espesor y separa a la probeta en dos partes

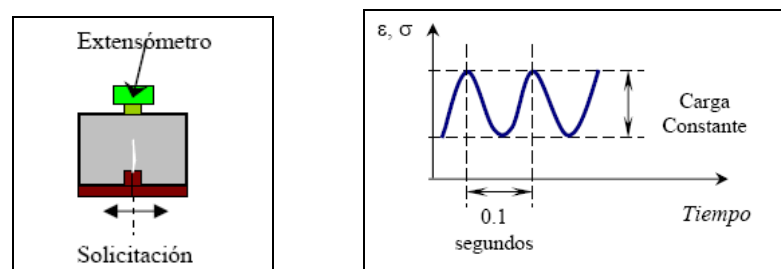


Figura 29 Probeta a Tracción y Carga aplicada en la etapa dinámica del ensayo

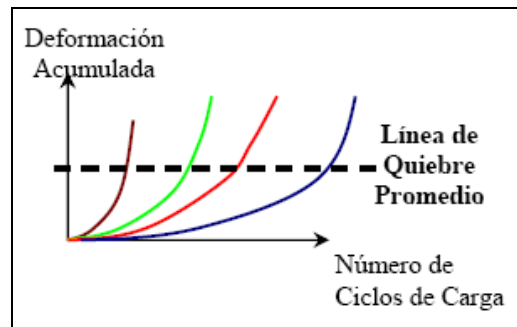


Figura 30 Deformación crítica "dC" del ensayo

Las siguientes ecuaciones determinaran la vida por fatiga del material:

Deformación Unitaria en la fibra inferior:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_s \cdot \frac{\left(\frac{h}{2} + y_o\right)}{\left(\frac{h}{2} - y_o\right)} \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

Siendo

$$y_o = \frac{h^2}{16.8 + 6 * h} \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Donde:

- ε<sub>i</sub>** : deformación unitaria en la fibra inferior, en mm/mm.
- ε<sub>s</sub>** : deformación unitaria en la fibra superior, en mm/mm.
- h** : altura del área resistente de la probeta, en mm.

Módulo de Rigidez:

$$S = \frac{P}{\varepsilon_s} \cdot \left( \frac{1}{b * h} - \frac{3 * h + 8.4}{b * h^2} \right) \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

- P** = carga máxima de tracción en el ensayo, en Kgf.
- h** = altura variable de la probeta, en cm.
- b** = diámetro de la probeta, en cm.

Deformación Crítica (**dC**): El criterio para determinar la deformación crítica de la mezcla asfáltica consiste en obtener las curvas de deformación acumulada versus el número de ciclos de carga y trazar una línea promedio sobre los puntos de inflexión, tal como se mostró en la figura 30.

Por otra parte los autores de este ensayo indican que si se considera el cálculo realizado mediante la fórmula de la Energía de Fractura, a las mezclas que arrojan una mayor deformación de rotura les corresponde una mayor energía de fractura.

Las leyes a fatiga que se obtienen pueden utilizarse para conocer y por lo tanto, priorizar el comportamiento a fatiga que tendrá una mezcla bituminosa determinada aplicada a casos reales, como son las estructuras de pavimentos compuestas por varias capas.

La universidad en su estudio concluye que existe una clara correlación entre la deformación a rotura del modo estático y la deformación crítica del modo dinámico, lo que en otras palabras, significa que mediante el ensayo BTD se puede establecer una relación directa entre la tenacidad y la fatiga de las mezclas asfálticas, quedando demostrado que a futuro sólo basta realizar el test en el modo estático para conocer qué mezcla asfáltica tiene mejor comportamiento a fatiga. Por consiguiente, al realizar el ensayo BTD en su modalidad estática se determina "dR", luego dada su correlación con la deformación crítica se obtiene el parámetro "dC". Entonces, si se conoce la deformación unitaria " $\epsilon_i$ " admisible en la capa de mezcla asfáltica y la deformación crítica "dC" (ya obtenida para la mezcla) se tiene el dato suficiente para ingresar al gráfico que relaciona el cociente entre la deformación unitaria y la deformación crítica ( $\epsilon_i/dC$ ) con la vida a fatiga y determinar el número de ciclos de carga que soportará la mezcla antes de que se fisure, o sea, su resistencia a la fisuración por fatiga. En consecuencia, a mayor deformación de rotura, mayor deformación crítica y mayor módulo de rigidez, lo que implica una mayor resistencia a la fisuración por fatiga, es decir, una mezcla que soporta un mayor número de ciclos de carga antes de su fisuramiento.

#### Hipótesis del Ensayo BTD

##### *Temperatura y Frecuencia de Cargas en el Ensayo:*

Se adopta una temperatura de prueba de 5°C, puesto que a bajas temperaturas, entre los -10°C y los +10°C y a altas frecuencias, las mezclas asfálticas poseen deformaciones en el rango prácticamente elástico. Por otra parte, para temperaturas mayores a 20°C y frecuencias entre los 30 y 50 Hz el calentamiento producido en la probeta y la fuerte disipación de energía durante el ensayo provocan un comportamiento viscoelástico no lineal de la mezcla asfáltica.

##### *Elasticidad:*

Como el ensayo se realiza a una temperatura de 5°C, se asegura un comportamiento elástico del material, ya que al retirar cualquier carga sobre la mezcla asfáltica, las deformaciones desaparecen de ella y responde sin disipar

energía. A su vez, se supone homogéneo porque sus propiedades no cambian de un punto a otro dentro de su composición, e isotrópico, pues las deformaciones a las que está sometida no dependen de la dirección en que aplique la carga.

*Carga Sinusoidal:*

Para el tipo de carga se supone una onda sinusoidal sin períodos de descanso, con una amplitud máxima constante y en función del tiempo expresado a través de su frecuencia.

*Compactación Marshall:*

Se supone una compactación mediante el procedimiento Marshall para un 4% de vacíos de aire en la mezcla total. Se simula una densidad real y el efecto que tendrá sobre el pavimento después de varios años de servicio producto de las cargas de tráfico.

Limitaciones del Ensayo

La temperatura de ensayo (5°C) no corresponde a una temperatura media ponderada anual que incorpore el daño producido en las diferentes capas que conforman el pavimento asfáltico y por ende, tampoco refleja el valor real en el cálculo del módulo de rigidez para cada capa (el efecto relativo de la temperatura se pondera en el módulo de rigidez, el cual va cambiando constantemente debido a las distintas temperaturas que afectan al pavimento durante el día).

Con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente se confirma que, la "vida", definida por la resistencia a fatiga en laboratorio de un material asfáltico, es generalmente menor que la observada en terreno debido a ciertas diferencias entre las condiciones de laboratorio y terreno; por ejemplo, en terreno existe un período de reposo aleatorio entre aplicaciones sucesivas de carga que le permite al material asfáltico recuperarse (efecto Healing). Generalmente, la carga cíclica en laboratorio se aplica de forma continua con períodos de reposo muy pequeños o sin períodos de descanso (caso del ensayo BTD).

También, en laboratorio, no se simula adecuadamente la variación lateral del tránsito que ocurre en terreno, pues las cargas aplicadas sobre las probetas afectan el mismo punto repetidamente. El promedio y la desviación estándar de la distribución lateral de la huella de la rueda debería tomarse en cuenta.

Aunque este ensayo aún no está normalizado, considera procedimientos y accesorios de equipos especificados por ciertos métodos ya normalizados, y normas tales como:

- Norma NLT-350 de 90 "Ensayo a fatiga en flexo tracción dinámica de mezclas bituminosas".

- Moldes y equipo de compactación Marshall, especificados en el método Marshall de diseño de mezclas asfálticas, incorporado en la norma AASHTO T-245 of. 82.

### 2.1.6.2 Ventajas y limitaciones

#### a) *Ventajas:*

1. En principio se elimina la necesidad de conducir la prueba por fatiga.
2. La teoría explica la propagación de grieta a bajas temperaturas.

#### b) *Limitaciones:*

1. En temperaturas altas, debido al tamaño de la zona plástica, los valores determinados para  $K_{1c}$  son afectados por el plano de esfuerzos, la condición y  $K_{1c}$  no es una constante del material.
2. La etapa estable de la propagación de grieta puede no explicar un rango conveniente del espectro de la fatiga. Las contribuciones exactas de la iniciación de la grieta y de las etapas inestables de la propagación de grieta no son conocidas.
3. La cuantificación de este método requiere una cantidad considerable de datos experimentales actualmente inasequibles incluyendo:

- a. Dureza de la fractura (valores de  $K_{1c}$ ).
- b. Tamaños iniciales de las grietas del pavimento.
- c. Una función de la calibración que relaciona el factor de la intensidad del esfuerzo,  $K_1$ , con las cargas aplicadas. Esta función depende de los aspectos geométricos de la capa del pavimento y del parámetro de la carga.
- d. Para determinar los momentos de flexión o las cargas aplicadas es necesario el factor de la intensidad del esfuerzo para cualquier tamaño dado de la grieta. Los efectos de variaciones de los patrones de la carga y de la secuencia de estas variaciones en la vida de la fatiga están todavía por establecer.
- e. Una ley del crecimiento de grieta de fatiga se debe establecer para cada material, así, son requeridos datos experimentales para definir las constantes del modelo teórico bajo consideración.
- f. Para representar condiciones de campo exactamente, debe realizarse un estudio de la fractura y un procedimiento analítico para utilizar estos resultados conjuntamente con los del modo de la abertura.

### 2.1.7 Ensayo Wheel - Track

#### 2.1.7.1 Modos de prueba

##### a) *Pruebas de laboratorio:*

Para simular mejor los efectos del rodamiento de la llanta sobre el pavimento y entender mejor el patrón de la iniciación y de la propagación de la grieta, se ha desarrollado una máquina que consta de un neumático de diámetro 0.25, y una trayectoria de 0.60 m, y con un ancho en el rango de 0.05 a 0.07 m. La losa es apoyada por una estera de goma. El área de contacto del neumático puede ser variada cambiando la presión de inflado o la carga. (Van Dijk, 1975). En este dispositivo; una rueda cargada con un neumático se mueve hacia adelante y

hacia atrás rodando sobre una losa del concreto asfáltico. El equipo asegura la medida de la característica principal, deformaciones en el fondo de losas, y la detección de la iniciación y de la propagación de la grieta.

Los resultados se pueden expresar en el desarrollo de tres etapas del proceso de fatiga, así: iniciación de las grietas (N1), grietas verdaderas (N2), y falla de la losa (N3).

Los datos obtenidos con esta prueba de fatiga han sido presentados por Van Dijk (1975). Sus resultados sugieren que los datos con deformación controlada pueden ser más apropiados para definir el agrietamiento del pavimento que los ensayos con esfuerzo controlado puesto que el anterior incluye la influencia de la propagación de grieta en el número de las repeticiones de la carga asociadas a inutilidad de la muestra. Según Van Dijk, la prueba de laboratorio con esfuerzo controlado parece proporcionar resultados conservadores. Él también observó que la diferencia entre el desarrollo de las grietas iniciales, N1, y el desarrollo de grietas verdaderas, N2, está relacionada con la diferencia entre los resultados de la fatiga medidos bajo las condiciones con esfuerzo controlado y deformación controlada.

Ventajas:

1. Una simulación mejor de las condiciones del campo.
2. La iniciación y el crecimiento de la grieta pueden ser supervisados.

Desventajas:

1. La limitación principal de la prueba es la velocidad del neumático.
2. Para las mezclas con módulo de rigidez bajo, el rodamiento llega a ser significativo y puede afectar los valores de la fatiga.
3. La prueba necesita mayor tiempo de ejecución, y un equipo especial.

#### *b) Pruebas a escala completa*

Para obtener la simulación a escala completa, pistas circulares y longitudinales de prueba han sido diseñadas y construidas en diversos países (la capa asfáltica tiene un espesor de 40 milímetros y el área de contacto de la carga del neumático es de aproximadamente 25 cm<sup>2</sup>). Los ejemplos bien conocidos incluyen las pistas circulares situadas en Nantes, Francia, y en el pullman, cerca del campus de la universidad del estado de Washington, y del ALF (Accelerated Loading Facility) de la administración federal de carreteras, en Colombia podemos observarlo en la Universidad de Los Andes, figura 31. Las pistas se dividen a menudo en secciones, cada una con diferente estructura de pavimento, y las cargas son aplicadas por varios sistemas de neumáticos duales.



*Figura 31 Carrusel de Fatiga, Universidad de Los Andes (Bogotá D.C.)*

En la pista circular, un mecanismo excéntrico asegura un movimiento lateral de los neumáticos duales de modo que la carga se aplique sobre la superficie del pavimento de una forma parecida a las condiciones reales. Otros ejemplos de pistas a escala completa se realizaron en: Australia (ARRB), Reino Unido (TRRL), Nueva Zelanda (Cantorbery), y Dinamarca.

**Ventajas:**

1. Excelente simulación de las condiciones de campo (estructura real de pavimento, la escala real de la carga de tráfico incorpora el recorrido lateral, uso de diversas velocidades, etc.).
2. Posibilidad de examinar el efecto de los cambios en la estructura del pavimento en su funcionamiento.
3. Una pista de prueba permite el estudio de otras formas de deterioro del pavimento además de fatiga (por ejemplo, la deformación permanente etc.).

**Desventajas:**

1. El costo de la inversión inicial y los costos anuales de operación y de mantenimiento son muy altos.
2. Se necesita un programa suplementario de pruebas en laboratorio, puesto que las pruebas de la pista no miden directamente características fundamentales de la mezcla.
3. En la pista circular de la prueba, la velocidad de la carga de la rueda es limitada debido a las fuerzas centrífugas.

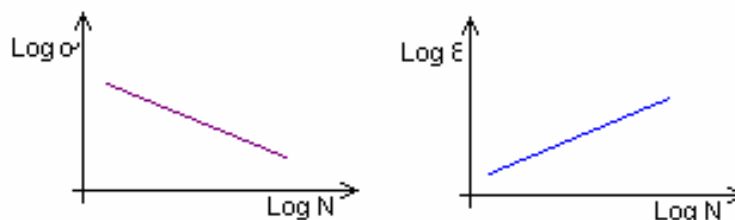
## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 ANÁLISIS TRADICIONAL

Al realizar los análisis por la forma clásica se pueden observar dos formas, ya sea por los análisis a la probeta, o los análisis al material.

Para el análisis de la probeta en términos generales, se buscaría determinar las leyes de fatiga para la mezcla asfáltica, con lo que se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de la mezcla.



*Figura 32 Curvas típicas de Fatiga*

Finalmente, los resultados experimentales más importantes serán los siguientes:

- Módulo de rigidez
- Energía disipada durante el ensayo
- Número de ciclos de carga para un dado criterio de falla

##### 3.1.1 Análisis por Esfuerzo o Deformación Controlada

Para el análisis de los resultados obtenidos después de realizar alguno de los ensayos mencionados en el capítulo anterior, surgen diversas formas de caracterización, siendo una de las principales el análisis según el tipo de ensayo realizado, ya sea por deformación controlada o por esfuerzo controlado (apto tanto para la probeta como para el material).

Si el ensayo realizado es por deformación controlada, se obtiene una gráfica de fuerza contra número de repeticiones de carga.

Si por el contrario se utiliza el ensayo controlando el esfuerzo, se obtiene una gráfica de deformación contra número de repeticiones de carga.

### 3.1.1.1 Criterios de Falla

Después graficar los datos correspondientes al tipo de ensayo (deformación controlada o esfuerzo controlado) puede conocerse el momento en el que ocurre la falla de la probeta, para esto algunos autores han coincidido en establecer tres diferentes criterios de falla, siendo estos:

- Cuando sucede la rotura de la probeta



Figura 33 Probeta fracturada

- Cuando la rigidez de la probeta se reduce a la mitad

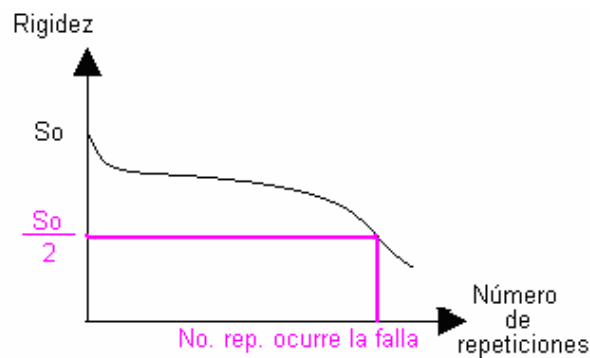


Figura 34 Gráfica Criterio de falla por rigidez

- Cuando la deformación final es dos veces la inicial.

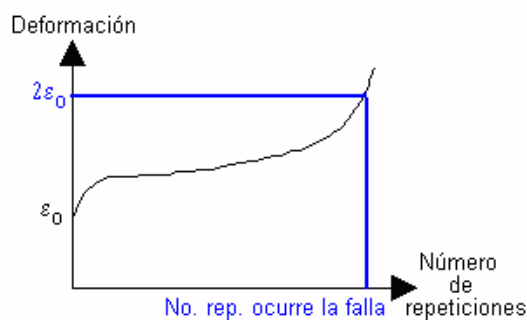


Figura 35 Gráfica Criterio de falla por Deformación

- Cuando la fuerza inicial aplicada a la probeta, se reduce a la mitad.

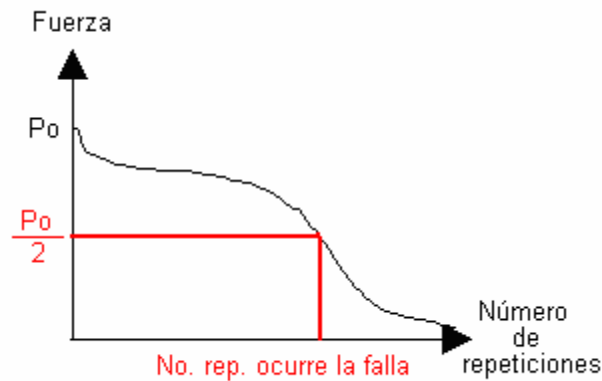


Figura 36 Gráfica Criterio de falla por Fuerza

## 3.2 NUEVOS ENFOQUES DE ANÁLISIS

Si el análisis clásico permite determinar la influencia de distintos factores sobre el comportamiento en fatiga de los materiales bituminosos, y de proponer correlaciones estadísticas, no permite explicar todos los comportamientos observados y, en particular, no tiene en cuenta algunos fenómenos que pueden influir sobre la duración de vida de una probeta como los descritos a continuación.

### 3.2.1 Enfoque Energético

Otra forma para realizar el análisis de la vida en fatiga de los materiales bituminosos es el análisis en términos de energía disipada, para la cual varios autores avanzaron en la hipótesis de una única relación entre la duración de vida en fatiga y la energía total disipada a la ruptura. Este enfoque energético podría conducir a resultados más coherentes que las leyes de fatiga usuales [Tayebali y AL, 1994] [Baburamani, 1992].

Ellos afirman que cuando se somete un revestimiento a una tensión cíclica, la densidad de energía local  $W_i$  producida por disipación viscosa durante el ciclo  $i$  es dada por la siguiente expresión:

$$W_i = \pi \varepsilon_i \sigma_i \sin \varphi_i \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

$\varepsilon_i$ : amplitud de la deformación al ciclo  $i$ ;

$\sigma_i$ : amplitud de la tensión al ciclo  $i$ ;

$\varphi_i$ : defasaje entre tensión y deformación al ciclo  $i$ .

Los autores afirman que esta energía varía en curso de prueba puesto que:

- el ángulo de fase aumenta en curso en prueba;
- la tensión disminuye en control de desplazamiento (la energía disipada va pues a tender hacia 0);
- la deformación aumenta en curso en prueba en control de fuerza (la energía va pues a aumentar).

La energía total acumulada  $W_N$  disipada sobre toda la duración de la prueba es obtenida por:

$$W_N = \sum_{i=1}^n W_i$$

(Ecuación 3.2)

Los primeros trabajos a la base del concepto de energía disipada son los Van de Dijk y AL en 1972 sobre el fatiga de películas finas de argamasas bituminosas, de trabajos que se extendieron a los revestimientos más tarde [Van Dijk y AL, 1977]. La principal hipótesis de este enfoque es la existencia de una relación entre la energía disipada acumulada durante la prueba  $W_N$  y el número de ciclos a la ruptura  $N_f$ :

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

(Ecuación 3.3)

Con

$N_f$ : duración de vida definida por el criterio de ruptura convencional;

$W_N$ : "energía" total disipada;

A, z: coeficientes determinados experimentalmente (A que varían entre 104 y 106 J/m<sup>3</sup>, z del orden de 0,6).

Sus autores dan esta relación por dependiente de la formulación de la mezcla pero independiente de la prueba de fatiga elegida (flexión 2 puntos o 3 puntos), de la temperatura (de 10°C a 40°C), del método de carga (control de tensión o deformación) y la frecuencia (de 10 a 50 Hz).

Esta afirmación parece sin embargo matizada por algunos de los resultados obtenidos en el marco del SHRP (Strategic Highway Research Program) [Tayebali y AL, 1994]. La relación aquí arriba se determinó para 16 materiales que contenían 2 tipos de betunes y dos tipos de agregados, para 2 temperaturas (0 y 20°C) y 3 tipos de pruebas. En las condiciones probadas, depende por supuesto del material probado pero también de la temperatura de prueba y el tipo de carga.

### 3.2.1.1 Predicción de la duración de vida por el enfoque energético

Los investigadores sostienen que en el caso teórico de una prueba a energía controlada, la energía disipada por ciclo seguiría siendo constante y la energía total acumulada sería proporcional a la energía  $W_0$  disipada en el 1er ciclo:

$$W_N = N_f W_0 \quad \text{con } N_f \text{ número de ciclos a la ruptura, (Ecuación 3.4)}$$

o sea

$$N_f = \left( \frac{A}{\pi \varepsilon_0^2 E_0 \sin \varphi_0} \right)^{\frac{1}{1-z}} \quad \text{Utilizando la Ecuación 3.3 (Ecuación 3.5)}$$

Según ellos, la duración de vida dependería esencialmente pues del nivel de deformación inicial y el módulo de pérdida  $E_0 \sin \varphi_0$  del revestimiento. Este enfoque es puesto en defecto por la dependencia de la relación (1) a las condiciones de tensión [Tayebali y AL, 1994].

Otra utilización de este enfoque por energía disipada fue puesta a punto por [Hopman y AL, 1989] y reanudada por [Rowe, 1993].

Este enfoque consiste en utilizar un informe de energía (energía proporcional) definido para un número  $n$  de ciclos de tensiones por:

$$\text{Energía Proporcional} = \frac{n W_0}{W_n} \quad \text{(Ecuación 3.6)}$$

Con

$W_0$ : energía disipada a primer ciclo completo

$W_n$ : energía total disipada al ciclo  $n$ .

El paso de la variación de esta "energía proporcional" en función del número de ciclos es interpretado por los autores en términos de fisura. El número  $N_1$  de ciclos que corresponden a una brusca variación de la curva se considera como el momento del trazado de una grieta macroscópica en el material en el caso de las pruebas con deformación controlada. Esto puede ser observado al graficar la variación del Energía proporcional en función del número de ciclos en una prueba a deformación constante según Rowe, 1993.

Este concepto para definir la duración de vida de un material es atractivo pero el punto que corresponde a la variación de cuesta es muy difícil de determinar para las pruebas a deformación constante.

Pronk, 1995 realizó pruebas con señales "compuestas": sucesión de señales sinusoidales de frecuencias diferentes, para complementar este ensayo. La aplicación del concepto de energía total disipada y del número de ciclos  $N_1$  definido permite anteriormente deducir el resultado de las pruebas con señales compuestas a partir de los resultados de pruebas sinusoidales clásicos.

## Limitaciones del concepto de energía disipada

Stéfani, 1993 y Lesueur et AL, 1995, están en desacuerdo con esta hipótesis, puesto que en la aplicación de la teoría anterior, la duración de vida en fatiga es proporcional al módulo de pérdida, algunos revestimientos al betún soplado por ejemplo deberían por su módulo de pérdida bajo, debido a un bajo ángulo de fase, presentar resultados excelentes a la fatiga, siendo esto falso. Además los materiales perfectamente elásticos no deberían fallar por fatiga, lo que es erróneo.

En realidad la energía disipada por viscosidad, como expresada en las fórmulas anteriores, no tiene necesariamente informe con la energía necesaria para la ruptura de las conexiones. En realidad se disipa sobre todo en calor.

### 3.2.2 Disipación Térmica

Los revestimientos bituminosos, a causa de su comportamiento viscoelástico presentan un carácter disipativo. La energía disipada por viscosidad, puede conducir en pruebas realizadas continuamente, a un aumento de temperatura de la probeta. Este aumento de temperatura fue puesto a relieve por Stéfani [1981] gracias a medidas de termografía infrarroja y modelado por Piau y Rousset [1983]. El calentamiento producido contribuye a una disminución local del módulo del material que es independiente del daño por fatiga propiamente dicho. Este fenómeno obra recíprocamente con el criterio de ruptura elegido en fatiga. Cuando el calentamiento es importante, el criterio de final de prueba no es más un criterio de ruptura por solo daño.

Medidas locales realizadas con ayuda de sondas platinos clavadas a la superficie de probetas trapezoidales por Rivière [1996], pusieron de manifiesto que para un mismo material, los calentamientos son superiores en las pruebas de fatiga a fuerza controlada con relación a las pruebas a deformación controlada.

### 3.2.3 Auto reparación

Este fenómeno corresponde al observable en la superficie de las calzadas, tras los períodos calientes en que las grietas que existían en algunas vías debidas a cargos importantes ejercidas por los camiones "se curaron". Un fenómeno similar pudo observarse sobre las calzadas de la noria de fatiga del LCPC de Nantes, para las cuáles los valores de deflexión disminuyen entre el final de un período circulado y el comienzo de la fase siguiente de prueba algunos meses más tarde [De la Roche et AL, 1994], esta observación que debe sin embargo también ponerse en paralelo con la evolución posible del estado hídrico del apoyo y en consecuencia de su fuerza de sustentación, durante el paro de las tensiones.

En laboratorio, el fenómeno de auto reparación fue puesto de relieve por Salinero, 1968. Se solicitaron algunas probetas en tracción hasta ruptura, luego las dos partes fueron vueltas a poner en contacto y mantenidas por presión (masa que pesa sobre la probeta reconstituida). Después de distintos períodos

de descanso, se vuelven a pegar las probetas y presentan resistencias a la tracción entre 80 y un 100% de valores obtenidos antes del descanso. La fuerza permanente ejercida durante el descanso tiene una gran influencia sobre los valores de resistencia a la tracción obtenidos.

Desde el punto de vista experimental, se pusieron a punto algunas pruebas que incluían períodos de descanso para representar mejor las tensiones reales. Desde el punto de vista análisis, se desarrollaron dos tipos de enfoques: enfoques que describen un daño continuo y enfoques que describen un daño localizado (propagación de grieta).

### **3.2.3.1 Pruebas continuas y discontinuas**

Con el fin de representar mejor las tensiones in situ, se pusieron a punto algunas pruebas con tiempo de descanso en numerosos laboratorios. Dos tipos de pruebas pudieron practicarse sobre probetas de distintas geometrías:

*a) Pruebas con salvas de tensión que alternan períodos de tensión continua y períodos de descanso;*

*b) Pruebas en impulsos (o intermitentes) para las cuales cada ciclo de tensión va seguido de un tiempo de descanso.*

Con el fin de limitar las perturbaciones debidas al efecto térmico y seguir el proceso de daño por fatiga en curso de prueba, se pusieron a punto algunas pruebas discontinuas (por impulsos), [Raithby y AL, 1972]; [Verstraeten, 1976].

#### Pruebas discontinuas en impulso

Estas pruebas son en realidad pruebas en impulso bastante "clásicos". Consisten en una serie de impulsos de 0,1s cada una, separadas en caso de descanso de 1,5 s. El módulo complejo del material se mide a continuación en pequeñas deformaciones después de un número previamente definido de impulsos.

#### Seguimiento de la temperatura

El seguimiento de la temperatura de superficie se realiza con ayuda de una sonda platina PT 100. Se coloca también una sonda de temperatura en el aire a algunos centímetros de la superficie de la probeta. Esta sonda permite seguir la evolución de temperatura debida al sistema de reglamento.

#### Problemas encontrados

Las pruebas en impulso son pruebas relativamente largas: una prueba que implica 200.000 ciclos de tensión dura alrededor de 4 días. Pues se realizan pruebas a elevado nivel de desplazamiento para limitar las duraciones,

haciéndose sin embargo para un número de ciclos suficiente para observar el fenómeno de fatiga ( $N > 10.000$  ciclos) en estas.

### Variación de la temperatura en curso de prueba

El seguimiento de la evolución de la temperatura de superficie de la probeta durante las pruebas de fatiga pone de manifiesto que la disipación térmica es escasa.

### Influencia de la temperatura

La comparación de pruebas al mismo nivel de distorsión pero a dos temperaturas diferentes permite observar la influencia del parámetro temperatura sobre la disminución de módulo en curso de prueba de fatiga.

Los distintos estudios realizados sobre este tema conducen a las siguientes conclusiones:

- Un aumento de duración de vida en fatiga, entre las pruebas continuas y discontinuas con una influencia de la temperatura de prueba y la duración del tiempo de descanso [Bonnaure y AL, 1983].
- Si la probeta sufre más daño antes del descanso, menos se recupera durante el descanso.
- Para los estudios hechos con cargas intermitentes, varios resultados ponen de manifiesto que más allá de un determinado límite, la prolongación de los períodos de descanso no aumenta la duración de vida en fatiga. Se considera a menudo que un coeficiente de diez entre las duraciones de los períodos de descanso y períodos de tensiones corresponde a una ganancia óptima de duración de la vida [Bazin y AL, 1967], [Bonnaure y AL, 1983], [AL Balbissi and AL, 1990], [Rivière, 1996].
- Si el módulo del asfalto es elevado, los períodos de descanso tienen poco efecto. Si el módulo del asfalto es bajo, la auto reparación aumenta con la duración períodos de descanso.

De la Roche, 1996, asegura que el análisis del efecto del tiempo de descanso no puede efectuarse sin tener en cuenta el fenómeno de disipación térmico. En efecto, el aumento de temperatura de la probeta en curso de prueba puede ser la causa de las divergencias observadas entre las duraciones de vida de materiales según que se efectúen pruebas continuas o con tiempo de descanso puesto que el calor producido puede evacuarse durante el tiempo de descanso.

Rivière [1996] realizó pruebas destinadas a evaluar la importancia de los fenómenos de auto reparación y evacuación de temperatura durante el tiempo de descanso, por aplicación de pequeñas tensiones supuestas no nocivas pero que suponen impedir el auto reparación entre dos impulsos de más fuerte amplitud. El estudio concluye al predominio efecto de enfriamiento durante el

tiempo de descanso y en consecuencia a la ausencia de auto reparación. Al contrario, pruebas similares realizadas por Pronk [1995] concluyen que el efecto de los fenómenos térmicos y la auto reparación son desdeñables.

### 3.2.4 Elementos Finitos

La estimación precisa de la vida a fatiga de una grieta está directamente relacionada con la determinación correcta de las tensiones de cierre o apertura de la misma. Su medición y estudio experimental es un proceso complejo e impreciso que repercute en una apreciable variabilidad en los resultados obtenidos en función de los procedimientos empleados. Por ello, como alternativa se recurre al análisis numérico, siendo el Método de los Elementos Finitos una de las opciones que mayor precisión aporta desde hace tiempo en la representación del problema de la falla por fatiga.

Desde los trabajos iniciales de J. Oliver (1986), son muchos los autores que han abordado este problema, también Humbert (1988). Otros trabajos recientes de interés que se pueden citar son el de Shen (1996), y el de Lytton (1995).

Para realizar un análisis por el método de elementos finitos, es necesario un software que trabaje en el rango viscoelástico o visco-elasto-plástico, conocer la geometría de la muestra a modelar que debe estar bien definida, la curva de esfuerzo - deformación para cada temperatura de ensayo, el modelo de calibración por el efecto de la frecuencia, definir el sistema de análisis de integración ya sea Mohr Coulomb o Druker Prager, las condiciones de frontera o borde y el tipo de imposición de carga, además, es necesario que el software tenga una entrada ya sea para cargas cíclicas o incrementales.

Los programas para el modelamiento por medio de elementos finitos, necesitan algunos datos de entrada para su funcionamiento, siendo los citados a continuación los utilizados en el programa desarrollado por el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos), el software plcd2:

- Geometría de la probeta
- Modulo de young
- Relación de poisson
- Espesor de la muestra
- Densidad del material
- Angulo de rozamiento
- Angulo de dilatancia
- Esfuerzo del umbral a tracción y a compresión
- Valor inicial de plasticidad
- Endurecimiento del material (si lo tiene).
- Valor de disipación plástica
- valor pico de tensión (valor máximo a al tracción y a la compresión)
- Ángulo de fricción interna; (definir si es variable o constante)
- Coeficiente de poisson; (definido en las tres direcciones principales)
- Coeficiente del Modulo de elasticidad; (definido en las tres direcciones principales)

- Relación entre los esfuerzos a compresión y tracción.
- Viscosidad

Además, este software, necesita definir los siguientes parámetros:

- Tamaño de la deformación: deformaciones pequeñas
- Tipo de deformación: deformaciones de la Lagrangean
- Sistema: Sistema nodal
- No. Dimensiones: dos (2)
- Tipo de tensión: tensión plana bajo el modelo bidimensional lineal
- Sistema de integración: Gauss
- Criterio de fluencia: Drucker Prager
- Modelo: visco elástico

La variable de daño necesaria para el estudio de la falla por fatiga es uno de los parámetros calculados a partir de los datos de entrada.

Algunos autores utilizan esta teoría del daño para describir la fatiga de los revestimientos [ Piau y AL, 1983 ], [ Alimani, 1987 ], [ Di Benedetto, 1996 ].

Los revestimientos bituminosos se suponen dañables con un comportamiento del material en el estado virgen de tipo viscoelástico. La hipótesis de equivalencia en deformación se utiliza para pasar, en el caso de una tensión sinusoidal, del comportamiento del material virgen al comportamiento del material dañado.

El parámetro de daño D caracteriza una pérdida relativa de módulo entre el estado inicial y el estado del material al ciclo N, del orden:

$$D = \frac{|E_0^*| - |E^*|}{|E_0^*|} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

La descripción se acompaña de una ley de daño que precisa la variación de D entre dos ciclos sucesivos ( $\Delta D$ ). Se toma generalmente bajo la forma:

$$\Delta D = f(D) g(\text{solicitud al ciclo N}) \quad \text{para } 0 \leq D \leq 1 \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

dónde f es una función de D que puede también depender de la temperatura y g una función de la tensión aplicada durante el ciclo N. Esta función g es en general, elegida como dependiente de la amplitud de tensión o deformación al ciclo N.

En el caso de un estado de deformación unido axial, la ley propuesta por Piau y Rousset [ Piau, 1989 ] y Alimani [ 1987 ] está de la forma:

$$\frac{\partial D}{\partial N} = B \left( \varepsilon_m^{xx} \right)^\beta \quad \text{para } 0 < D < 1 \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

B y  $\beta$  reales positivos,

$\varepsilon_m^{xx}$  amplitudes de deformación.

Esta ley permite encontrar la curva de disminución de rigidez de la probeta durante las pruebas de fatiga en flexión, el modelo efectuado que tiene también en cuenta los efectos térmicos con la hipótesis que toda la caída inicial de módulo enteramente se debe al aumento de temperatura figura (B.I.17).

Un enfoque similar va seguido por Di Benedetto y AL [ 1996 tiene y b ]. No obstante, los autores consideran que es necesario eliminar el principio de la curva de variación de  $|E^*|$  en función de N en el análisis del daño, el calentamiento de la probeta por disipación interna viscosa que se supone preponderante durante esta fase.

Didier Bodin (2001) haciendo uso de esta herramienta computacional de Elementos Finitos, realizó un modelamiento de una probeta trapezoidal usada por el ensayo de flexión en dos puntos, para simular el daño ocasionado por el calentamiento de la probeta y su influencia en la falla, y también para incluir la disminución de la rigidez que acarrea cada ciclo de carga.

Para esto el realizo dos modelos, uno para observar la influencia del calentamiento de la probeta y otro para simular la disminución de la rigidez ya que después de cargada la probeta van a existir algunos puntos donde la rigidez cambia, y a partir de los resultados obtenidos encontrar un factor de corrección para estos dos efectos que no se tiene en cuenta en los ensayos de laboratorio y así poder estandarizar los resultados que arrojan los diferentes ensayos.

Todo esto sabiendo como funciona el ensayo de flexión en dos puntos con la probeta trapezoidal, y conociendo de antemano la forma y lugar de falla de la probeta en este ensayo.

## CAPÍTULO IV

### EFFECTOS DE DIFERENTES PARAMETROS QUE AFECTAN LA VIDA EN FATIGA

#### 4.1 PARÁMETRO TENIDOS EN CUENTA POR EL ANÁLISIS DE LA VIDA EN FATIGA

Los ensayos que caracterizan la fatiga en materiales bituminosos estudiados anteriormente, tienen limitaciones para representar el comportamiento real de las mezclas asfálticas y sus modos de falla, esto ocurre porque son muchas las variables que afectan el desempeño a fatiga de mezclas asfálticas, tales como: la forma y tamaño de la probeta, el contenido de agua, la forma, tamaño y textura de los agregados, la forma de aplicación de la carga, la temperatura, el tipo de ensayo, el tipo y contenido de asfalto, la granulometría, la energía de compactación aplicada a las probetas, el contenido de vacíos, entre otras. A continuación se describirán algunas de las variables anteriormente mencionadas:

##### 4.1.1 Forma, Tamaño y Textura De Los Agregados

Para una buena resistencia a la fatiga, la textura de la superficie del agregado juega un papel importante. En la vida por fatiga, porcentajes altos de partículas planas y elongadas indican agregados propensos a fallar ante esfuerzo cortante en la mezcla, lo cual incrementa las posibilidades de que aparezcan fisuras, y posterior falla por fatiga.

##### 4.1.2 Tipo de Asfalto

Para un mayor entendimiento de las características de los asfaltos utilizados, se muestra la siguiente tabla:

Tipo de Asfalto	Clasificación	Susceptibilidad a la Temperatura	Absorción del agua	Contenido de Asfalto	Viscosidad	Índice de penetración	Rigidez
					a 25° C	IP	
AAG-1	AC 30	baja	1,2%	5	3.540.000	-0,5	menor
AAK-1	AR 4000	mayor		20,1	1.077.000	-1,5	mayor

Tabla 1 Características de los asfaltos utilizados

Kim et al (1991) realizaron un estudio en el que analizaron el efecto del tipo de asfalto sobre el comportamiento por fatiga de las mezclas asfálticas. Se utilizaron dos tipos de asfaltos (AAK-1 y AAG-1) y dos temperaturas de prueba (0 y 20°C), sus resultados muestran que las mezclas que contienen asfaltos más rígidos demuestran más resistencia a la fatiga que las mezclas elaboradas con asfaltos más flexibles. Observándose además, que la diferencia en la resistencia a la

fatiga de las dos mezclas es más pronunciada para 20°C que para 0°C altas temperatura que para bajas temperaturas.

En el estudio realizado por Monismith et al (1994) se utilizaron los dos tipos de asfaltos descritos, y con base de los resultados del análisis estadístico, la vida por fatiga es una respuesta variable sensible al tipo de asfalto para todos los tipos de prueba, en pruebas de esfuerzo controlado para Flexión en vigas, y en pruebas de fatiga diametral se muestra una interacción entre el tipo de asfalto y la temperatura. La prueba de esfuerzo controlado de fatiga por flexión en vigas muestra una interacción entre el tipo de asfalto y el contenido de asfalto.

Para los ensayos con esfuerzo controlado, la vida en fatiga aumenta cuando se utiliza un asfalto más flexible, mientras que en ensayos con deformación controlada la vida en fatiga disminuye al utilizar este mismo tipo de asfalto. Como era de esperar, si cambiamos el tipo de asfalto por uno más rígido, ocurre lo contrario, la vida por fatiga disminuye en los ensayos con esfuerzo controlado y aumenta en los ensayos con deformación controlada.

#### **4.1.3 Contenido de Ligante Asfáltico**

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla es un proceso de adaptación de dos objetivos: tener tanto asfalto como sea posible para aumentar la fatiga y durabilidad, como el mínimo posible para no tener problemas de deformación permanente.

Una mezcla asfáltica muy rígida tiende a tener una baja resistencia a la fatiga cuando se deflecta la capa asfáltica. Los materiales rígidos, las altas deflexiones y los grandes esfuerzos tensionales disminuyen la vida útil del pavimento ante la fatiga.

Barksdale (1978) analizó las propiedades de fatiga de mezclas para bases de concreto asfáltico. Evaluó la influencia del contenido de asfalto para una mezcla con contenido de asfalto óptimo de 4.8% basado en el método de diseño Marshall. Encontró que un incremento en el contenido de asfalto de 4.25 a 4.5% incrementa la vida por fatiga en un 350% y que un incremento de 4.5 a 4.75% incrementa la vida por fatiga en un 95%.

Barksdale concluyó que el mejoramiento en la resistencia a la fatiga al incrementar un porcentaje específico de contenido de asfalto se vuelve menos significativo al utilizar un contenido de asfalto mayor.

Kim et al (1991) concluyó que el efecto del contenido de asfalto es mucho más significativo para temperaturas de prueba de 0°C que para temperaturas de 20°C. Un incremento de 0.6% en el contenido de asfalto de la mezcla proveerá más resistencia al agrietamiento por fatiga a 0°C, donde la preocupación es mayor.

Monismith et al (1994) concluyó, que el contenido de asfalto no tuvo ningún efecto significativo en la vida en fatiga en la prueba con deformación controlada, mientras en la prueba con esfuerzo controlado de fatiga por flexión en vigas, se

observó que un contenido de asfalto alto disminuye la vida por fatiga obtenida con un contenido de asfalto óptimo, además existe una interacción entre el contenido de asfalto y la temperatura de forma significativa, la vida en fatiga es mayor en mezclas con una temperatura de 0° C que de 20° C, cuando lo comparamos con las mezclas con contenido de asfalto alto.

Estudios realizados en Costa Rica, por el laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales, LANAMME (2005), revelaron que incrementos en el contenido de ligante asfáltico, determinan un mayor recubrimiento de las partículas de agregado y un aumento en la proporción de asfalto en la sección normal a la dirección de los esfuerzos a tensión. Dado que los esfuerzos a flexotracción se concentran en el ligante asfáltico (ya que las partículas de agregado son mucho más rígidas), películas más gruesas significan menores esfuerzos al ligante, lo que ocasionan una mayor vida por fatiga.

#### **4.1.4 Contenido de Vacíos**

Kim et al (1991) analizaron en su estudio el efecto de los contenidos de vacíos sobre el comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas. Concluyeron que para una temperatura de prueba de 0°C, el efecto del contenido de vacíos no es tan pronunciado como el observado para una temperatura de 20°C. Este comportamiento puede ser explicado en base a los procesos de iniciación y propagación de grietas. El crecimiento en la deformación horizontal para una temperatura de 0°C es casi insignificante hasta un cierto punto, y entonces el crecimiento se vuelve repentinamente caótico, lo cual resulta en una falla completa del espécimen. Mientras tanto, el crecimiento en la deformación horizontal para 20°C es más gradual. Por lo tanto, se puede dibujar fácilmente una conclusión sobre el hecho de que el proceso de iniciación de grietas es el proceso principal a 0°C y el proceso de propagación de grietas se vuelve más importante cuando la temperatura se incrementa. Con este concepto como antecedente, se puede concluir que el efecto del contenido de vacíos para 20°C es más pronunciado que para 0°C porque, para la temperatura mayor, la falla está gobernada por la propagación de las grietas a través de la unión de vacíos. En resumen, un incremento en el contenido de vacíos corta la vida por fatiga con un efecto más pronunciado para 20°C que para 0°C.

Monismith et al (1994) emplearon dos niveles de esfuerzos de compactación. El nivel de compactación mas bajo fue ajustado para proveer un contenido de vacíos del 8% en el espécimen. El nivel de compactación más alto fue ajustado para producir un contenido de vacíos del 4%. Se utilizó un compactador por amasado para fabricar los especimenes. Las pruebas arrojaron que el contenido de aire tiene una influencia significativa en la vida por fatiga en todas las pruebas, siendo la vida por fatiga alta para mezclas con bajo contenido de vacíos que las mezclas con alto contenido de vacíos. En la prueba con esfuerzo controlado de fatiga por flexión en vigas, el efecto del tipo de asfalto fue tal que los especimenes que exhibieron mayor módulo de rigidez, (mezclas con asfalto tipo AAK-1), tuvieron baja vida por fatiga que los que exhibieron bajo módulo de rigidez. El efecto de contenido de vacíos de aire es tal que los especimenes con mayor modulo de rigidez exhibe alta vida por fatiga que los especimenes con

bajo módulo de rigidez. El efecto negativo del modulo de rigidez en la vida por fatiga se debe al tipo de asfalto y al contenido de vacío de aire.

El LANAMME, 2005, encontró que un contenido de vacíos de aire bajo tiene al menos dos efectos que contribuyen a una mayor vida a fatiga. Primero, puesto que el aire transmite poco o ningún esfuerzo, si se reemplaza por ligante asfáltico o agregado, se reduce el nivel de esfuerzo en dichos componentes. Segundo, un contenido de vacíos de aire bajo genera una estructura ligante-agregado más homogénea, lo que resulta en menor concentración de esfuerzos en el interfase sólido-aire. Es decir, en vacíos llenos con asfalto se ha encontrado que una porosidad reducida incrementa la rigidez y la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica. Esto generalmente se ha relacionado con los vacíos llenos de asfalto (VFA). Mientras que en una película de asfalto entre agregados, la combinación del incremento en el contenido de ligante asfáltico y la reducción consecuente en los vacíos de aire, transmite los esfuerzos de tensión a través del sólido, en concentraciones reducidas debido a los vacíos limitados y donde las partículas de agregado están en contacto directo, las micro-grietas que empiezan a formarse bajo cargas repetitivas de carga crecen más lentamente y requieren de mayor tiempo para interconectarse debido al reducido número y contenido de vacíos de aire, que concentran esfuerzos y eventualmente permiten que las grietas se extiendan de un lado a otro. Lo que repercute en un aumento en la vida por fatiga.

Pell et al., 1975 encontró que cuantitativamente, el efecto de fatiga del contenido de asfalto y del contenido de vacío en la vida de las mezclas de asfalto, se pueden comprobar por un factor de corrección proporcional a:

$$\frac{V_B}{(V_B + V_V)} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

donde está el volumen del vacío de aire  $V_V$  (por ciento) y el volumen de asfalto  $V$  (por ciento) y

$$V_B = \frac{[P_{asp} \cdot G_{agg} \cdot (1 - V_V)]}{[100 \cdot G_{asp} + P_{asp} \cdot G_{agg}]} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

donde  $P_{asp}$  es el peso del asfalto en porcentaje (base agregada), el  $G_{asp}$  es la gravedad específica del asfalto, y  $G_{agg}$  es la gravedad específica del agregado. Santucci (1977) ha analizado los datos de Pell y de Cooper (1975) y ha observado que los ajustes de la relación de datos de laboratorio (Epps, 1969) dados por California mezclan "razonablemente" bien.

#### **4.1.5 Granulometría**

La influencia que tiene el tipo de granulometría sobre el comportamiento a fatiga de una mezcla asfáltica depende fuertemente de las características de los agregados minerales y del tipo de banda granulométrica especificada para su elaboración.

Elliott et al (1991) revisaron en su estudio el efecto de la variación de la granulometría sobre la vida por fatiga de un pavimento asfáltico. Para la obtención de la vida por fatiga utilizaron información de resistencia a la ruptura por tensión. Considerando además, la variación del contenido de vacíos en un rango entre el 4 y 7%. Los resultados indican que la predicción de vida relativa es totalmente sensible a las variaciones de la resistencia, mostrando que podría esperarse que las variaciones en granulometría redondeada tendrá significativamente un impacto muy perjudicial sobre la vida por fatiga. Los resultados sugieren también que, dentro del rango normal de contenidos de vacíos y variación de granulometrías, la vida por fatiga es generalmente más sensible al contenido de vacíos (es decir, la compactación) que a la granulometría.

Monismith et al (1994) empleó dos tipos de agregados para el análisis por fatiga. Los resultados obtenidos muestran que las cuatro pruebas estudiadas exhibieron sensibilidad al tipo de agregado, así: las mezclas que contenían agregado con un alto potencial de adherencia tenían una baja vida en fatiga que las mezclas con agregado con bajo potencial de adherencia.

Freeme et al., 1973, concluyó que para una mayor vida en fatiga se recomiendan mezclas con agregados denso-graduados para pavimentos con capas del asfalto espesas, y agregados con menor graduación (menos finos) para pavimentos con capas del asfalto delgadas. Alternativamente, las mezclas que contienen una gradación abierta parecen producir una respuesta mejor a la fatiga que las mezclas continuamente gradadas usadas normalmente en Estados Unidos.

Para el estudio de la vida por fatiga en materiales bituminosos, no existe grandes correlaciones entre esta y la granulometría, en estudios realizados en Costa Rica por el LANAMME, se encontró que granulometrías más finas han llegado a desempeñarse mejor que granulometrías gruesas, con respecto a la fatiga.

#### **4.1.6 Tipo y Contenido de Modificadores**

Aglan et al., 1991, bajo esfuerzos por fatiga, utilizando el enfoque fenomenológico, el cual está basado en el concepto de Wohler, estos investigadores concluyeron que los aditivos aumentan la vida por fatiga para temperaturas de 0 y 68°F (-18° C y 20 °C). Sin embargo, cuando las mezclas que contenían aditivos fueron envejecidas a 140°F (60 °C) por 7 días, el tiempo de vida por fatiga decreció considerablemente en comparación con sus contrapartes no envejecidas.

Piggott y Woodmans (1977) basados en pruebas de laboratorio, notaron que la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas modificadas con caucho son mejores que las mezclas convencionales, y concluyeron que adicionando 5% de caucho reciclado a las mezclas asfálticas en caliente probablemente incrementarán al doble la resistencia a la fatiga de un pavimento comparado con los valores obtenidos para un pavimento convencional.

Vallerga et al (1980) estudiaron la resistencia a la fatiga de un tipo de asfalto modificado con caucho y encontraron que el comportamiento a la fatiga de las mezclas modificadas mejoró al incrementar el contenido de caucho.

Khosla (1991) realizó un estudio sobre el efecto del uso de modificadores sobre el comportamiento de pavimentos asfálticos. Los resultados obtenidos indicaron que el efecto de los modificadores sobre las propiedades de las mezclas asfálticas no es significativo para temperaturas bajas pero es muy pronunciado para temperaturas altas. El comportamiento observado mostró que los polímeros son más significativos en la reducción de las grietas por fatiga.

Rebala y Estakhri (1995) encontraron que las mezclas asfálticas modificadas con caucho tienen el potencial para mejorar significativamente el comportamiento por fatiga y el agrietamiento por temperatura de los pavimentos de concreto asfáltico, pero sólo cuando se utiliza el método húmedo (incorporación del caucho en las mezclas a temperaturas altas) y el cementante se diseña adecuadamente.

Ali et al (1995) analizaron las características de fatiga en mezclas modificadas con material de desecho de las construcciones. Los resultados que obtuvieron indican que la utilización del material de desecho mejora el tiempo de vida por fatiga en las mezclas asfálticas, especialmente para un contenido de 25%.

Khattak y Baladi (1998, 2001) analizaron el comportamiento por fatiga de mezclas asfálticas modificadas con polímeros. Los resultados obtenidos en estos estudios indicaron que la vida por fatiga de las mezclas modificadas es mayor comparada con las mezclas convencionales y con las mezclas procesadas. El incremento en la vida por fatiga se debe a un incremento en la resistencia a la tensión y en las propiedades plásticas de las mezclas.

#### **4.1.7 Temperatura**

Monismith et al (1994) observaron el gran efecto que tiene la temperatura de prueba sobre los valores de tiempo de vida por fatiga. En la mayoría de las pruebas, la vida por fatiga es mayor en temperatura de 0° C. Sin embargo, en la prueba controlando la deformación, la vida por fatiga es menor a 0° C, que a 20° C, como era esperado.

Pell, 1962, Para las pruebas con esfuerzo controlado, estudios realizados sobre arena- betún en flexión puso de manifiesto que la duración de vida en fatiga disminuye cuando la temperatura aumenta.

#### 4.1.8 Tipo de Carga Aplicada

El tipo y duración de carga usada como carga repetitiva podría simular actualmente lo que ocurre en la realidad. Es razonable suponer que el pulso de carga puede ser una onda de tipo *haversine*, *sinusoidal* o *triangular* y que la duración de la carga dependerá de la rapidez del vehículo y de la profundidad del punto considerado bajo la superficie del pavimento.

La diferencia entre la carga *haversine* y la *sinusoidal*, se muestra en la figura 37, siendo la carga *haversine* una onda con la forma *sinusoidal* pero en el RANGO POSITIVO.

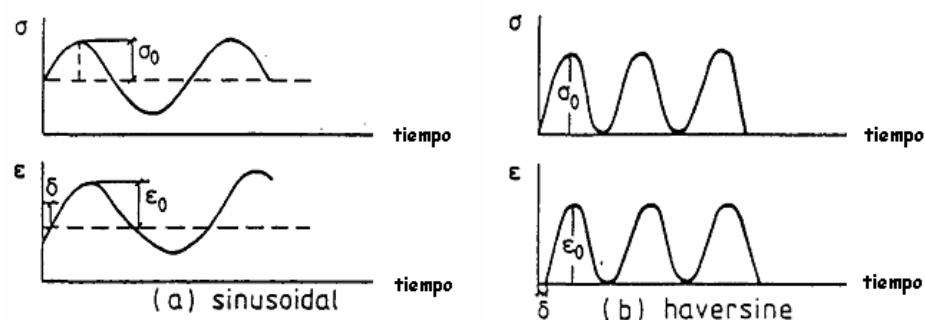


Figura 37 Pulso Sinusoidal y Haversine

En estudios realizados por el LANAMME concluyen que la simulación *haversine* es la que se acerca de la mejor manera a la verdadera aplicación de carga en el sitio, y una vez que se tiene la curva de fatiga en el laboratorio, debe realizarse un proceso de calibración en sitio, con duración mínima de 15 años, durante este proceso se encuentra un factor que se le aplica a la curva de laboratorio para calibrarla a condiciones de sitio, obteniendo una ecuación por el siguiente orden:

$$N = C * K_1 * (\text{deformación})^{-K_2} * (\text{Modulo de elasticidad})^{-K_3} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Siendo C el valor del factor de sitio encontrando durante el proceso de calibración.

#### 4.1.9 Contenido de Agua

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

Básicamente el contenido de agua en mezclas asfálticas, particularmente países tropicales, esta asociados con problemas para compactar la mezcla en sitio, lo

que produce un aumento en el contenido de vacíos y un posterior deterioro de la vida a fatiga de la mezcla. En un estudio realizado por el ingeniero Luis Guillermo Loria, en Costa Rica con el LANAMME, se determinó que aumentar el contenido de agua de una mezcla implica disminuir la resistencia de ella a la tensión y la disminución del módulo de resiliencia, lo cual también incidirá en un decremento de la vida a fatiga de la mezcla.

#### **4.1.10 Modo de Carga**

Monismith et al (1994) concluyó que la vida a fatiga es típicamente mayor en carga con deformación controlada que en cargas con esfuerzo controlado. En resumen, el análisis realizado por la SHRP A – 312 demostró la importancia del modo de carga en la interpretación apropiada de los datos de fatiga en laboratorio. Confirmó que la vida por fatiga bajo cargamento con deformación controlado exceden generalmente a las mezclas bajo cargamento con esfuerzo controlado y que, los efectos del módulo de rigidez de la mezcla en la vida por fatiga se invierten generalmente para los dos modos del cargamento. Sin embargo, cuando los resultados de la prueba se interpretan en los términos del funcionamiento esperado de las mezclas de pavimentos, se muestra que la prueba con esfuerzo controlado y la prueba con deformación controlada pueden rendir resultados similares. La tabla 2, muestra la comparación entre el cargamento con esfuerzo controlado y deformación controlada:

Los resultados de la prueba pueden también conducir a diversos diseños de la mezcla, por consiguiente, se han hecho las pruebas para determinar qué modo de carga simula lo mejor posible las condiciones reales del pavimento (Monismith y Deacon, 1969, y Monismith et al., 1977).

#### **4.1.11 Intervalo de Tiempo entre Cargas Sucesivas**

Yandell y Lytton (1979) en su estudio sobre esfuerzos residuales en un pavimento, encontraron que debido a la deformación residual a tensión o compresión, los esfuerzos a tensión resultantes de una aplicación de carga son aproximadamente entre el 80 y 120% de la deformación resultante de la aplicación de la carga precedente. Durante el periodo de reposo entre las cargas, pueden presentarse dos procesos de recuperación. En un proceso, el material se relaja y pierde algo de su esfuerzo residual, incrementando o disminuyendo de esta manera el nivel de esfuerzos aplicado por la siguiente sollicitación de carga. En el otro proceso, las microgrietas en el material más allá de las grietas visibles se permiten remediar parcialmente debido a la recuperación viscoelástica del cemento asfáltico y parcialmente debido a la reformación de fuerzas confinantes en el material después de la eliminación de la carga aplicada. Estos dos efectos juntos resultarán en el incremento de la vida por fatiga de los pavimentos sujetos a las cargas del tránsito.

<b>VARIABLES</b>	<b>ESFUERZO CONTROLADO (CARGA)</b>	<b>DEFORMACIÓN CONTROLADA (DEFLEXIÓN)</b>
Definición de la falla número de ciclos	Bien definido desde las fracturas del espécimen	Arbitrario en el sentido que la prueba es discontinua cuando el nivel de carga ha sido reducido a alguna proporción de su inicial valor; por ejemplo, a 50 por ciento del nivel inicial
Dispersión de los datos de prueba de fatiga	Menor dispersión	Mayor dispersión
Número requerido de muestras	Más pequeño	Más grande
Simulación de influencias a largo plazo	Las influencias a largo plazo tales como envejecimiento conducen a un módulo de rigidez creciente y probablemente a un aumento de la vida de fatiga	Influencias a largo plazo que llevan a un módulo de rigidez en aumento llevará a la vida de fatiga reducida
Magnitud de vida de fatiga, N	Vida generalmente más corta	Vida generalmente más larga
Efecto de variables de la mezcla	Más sensible	Menos sensible
Proporción de dispersión de energía	Más rápidamente	Más lento
Proporción de propagación de la grieta	Más rápidamente que in situ	Más representativo de las condiciones in-situ
Efectos beneficiosos del periodo de descanso	Efecto beneficioso mayor	Menos efecto beneficioso

*Tabla 2 Efecto del tipo de ensayo*

## CONCLUSIONES

Este proyecto es un punto de partida para futuros investigadores que deseen ahondar el tema de la fatiga de materiales bituminosos. Puesto que en este se consignaron algunos métodos de ensayo para la modelación en laboratorio de este tipo de falla, algunos de los criterios de falla tenidos en cuenta por diversos estudiosos del tema, y diferentes parámetros que afectan la vida por fatiga.

Los trabajos existentes deben proseguirse para describir mejor el fenómeno de fisura por de fatiga, además es conveniente iniciar un estudio más profundo sobre el mismo en Colombia, dado que las condiciones varían de un país a otro, y estas afectan el comportamiento del material y posterior falla por fatiga.

El fenómeno de fatiga constituye uno de los principales métodos de degradación de las estructuras de calzadas. Una descripción correcta de este fenómeno en laboratorio es pues lo que está en juego a nivel importante. Cualquiera que sea el análisis utilizado, conviene delimitar los distintos fenómenos adjuntos que se producen en curso de prueba y que pueden modificar el resultado.

En general, para mezclas gradadas continuamente, los dos factores primarios que afectan la respuesta de la fatiga son el contenido del asfalto y el contenido de aire. El tipo de agregado parece tener menos influencia. Así, desde el punto de vista del diseño de la mezcla, en ella debe ser incorporado tanto asfalto como sea posible. Hay un límite superior para el contenido de asfalto, debido a requisitos de estabilidad; sin embargo, este límite superior debe ser cercano al máximo para que aumente la resistencia de la fatiga.

El modo de carga con esfuerzo controlado parece representar la respuesta de capas de pavimentos de asfalto gruesas a la acción de carga repetitiva, mientras que el modo de carga con deformación controlada es más conveniente para los pavimentos delgados. Los resultados en pruebas de carga con deformación controlada conducen a mayor vida en fatiga.

El contenido de vacíos de aire es un factor importante que afecta la vida de fatiga de una mezcla del asfalto, de manera que debe ser tan pequeño como sea posible.

Evaluar el efecto del calentamiento sobre la disminución de módulo, introducir tiempo de descanso entre tensiones que permiten evacuar el calor producido, son variables que afectan los resultados de los ensayos en laboratorio y a su vez los alejan del comportamiento real del pavimento, por esto es necesario su implementación durante el desarrollo de las pruebas para así hacer una acercamiento a la realidad.

El avance tecnológico llevado a cabo en los últimos años, ha permitido el desarrollo de herramientas computacionales como software de elementos finitos, capaces de modelar el comportamiento interno del material.

## RECOMENDACIONES

Un tema de investigación tendría como objetivo establecer la relación entre ensayos de laboratorio con diferentes métodos de sollicitación de la probeta. Intentando predecir el resultado de otro ensayo a partir de unas pruebas realizadas. Una vez logrado lo anterior, sería posible avanzar hacia una correcta predicción de la vida en fatiga de una estructura bituminosa en servicio.

Los equipos de ensayos, para investigación de la fatiga, deberían permitir variaciones en:

- La geometría de las probetas
- La forma de sollicitación
- Los niveles de esfuerzo y deformación, en el ensayo en curso.

Los equipos de ensayos, además de medir esfuerzos y deformaciones, debieran permitir medidas de:

- Variación en la temperatura de las probetas.
- Componente viscosa y elástica de cada aplicación de carga.

## BIBLIOGRAFÍA

Ali, N., et al. (1995). "Mechanistic Evaluation of Asphalt Concrete Mixtures Containing Reclaimed Roofing Materials". Transportation Research Record No. 1515, pp. 28-36.

American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils. AASHTO Designation TP - 8, Washington, D.C., 1986.

Adedimila (a.s.) and Kennedy (t.W.). -Fatigue and Resilient Characteristics of Asphalt Mixtures by Repeated Load Indirect Tensile Test. Research Report 183-5, Center for Highway Research, The University of Texas - Austin, 1975.

Albalbissi (a.h.) and Little (n.). -Effect on fracture healing on laboratory to field Shift Factor. Transportation Research Board, 69th Annual Meeting, Washington D.C., 1990.

Alimami (m.). -Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paris VI, 1987.

Barksdale, R.D. and Miller, J. H., III (1977). Development of Equipment and Techniques for Evaluating Fatigue and Rutting Characteristics of Asphalt Concrete Mixes. Report SCEGIT-77-147. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Bazin (p.) and Saunier (j.b.). -Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes. Proceeding of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1967.

Bonnaure (f.), Huibers (a.) and Bonders (a.). -Etude en laboratoire de l'influence des temps de repos sur les caractéristiques de fatigue des enrobés bitumineux. Revue Générale des Routes et Aéroports, N° 595, mars 1983.

Bonnot, J. (1986) "Asphalt Aggregate Mixtures." Transportation Research Record 1096, Transportation Research Board, Washington, D. C., 42-50.

CEPEDA ALDAPE JORGE BALDEMAR 2001 Análisis Del Comportamiento De Mezclas Asfálticas A Fisuración Por Fatiga Mediante La Aplicación De Un Nuevo Ensayo Dinámico A Tracción Directa Universidad: Politécnica De Cataluña

C. L. Monismith, C.L., Tsai, B., Tayebali, A.A. (1994). Stiffness of Asphalt Aggregate Mixes. Report prepared for SHRP Project A-312 y A-404, Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Chantal de La Roche Saint André née Renaud, (1996), Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux.

DI BENEDETTO (H.), SOLTANI (A.), CHAVEROT (P.) : "A rational approach for fatigue damage", 1er European Eurobitume and Eurasphalt Congress, Strasbourg, 1996 a.

Di benedetto (h.), ashayer soltani (a.) and chaverot (p.). -Fatigue damage for bituminous mixtures : a pertinent approach. Journal of the Association of Asphalt Paving technologists (AAPT), 1996 b.

Di benedetto (h.) and des croix (p.). -Binder-mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour. 1st European Eurasphalt and Eurobitume Congress, may 1996 c.

Elliot, R.P., Ford, M.C, M. Ghanim, M.(1991). Effect of Aggregate Gradation Variation on Asphalt Concrete Mix Properties. In Transportation Research Record 1317, TRB, National Research Council. Washington, DC, pp. 52-60.

Epps (j.a.) and monismith (c.l.). -Influence of mixture variables on the flexural fatigue properties of asphalt concrete. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 38, pp.423-458, 1969.

Estay Covarrubias, Vladimir Alejandro, (2002), Proyecto de grado, Estudio del comportamiento a Fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTB, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras civiles, Director Carlos Wahr D.

Freeme, C.R., and Marais, C.P. (1973). Thin Bituminous Surfaces: Their Fatigue Behavior and Prediction, Highway Research Board, Special Report No. 140, 158-179.

Hopman (p.c.), kunst (p.a.j.) and pronk (a.c.). -A reviewed interpretation method for fatigue measurements : verification of Miner's rule. Proceedings of the 4th Eurobitume Symposium - Madrid, Vol. 1, pp.557-561, 1989.

humbert (p.). -Cesar-LCPC, un code général de calcul par éléments finis . Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 160, pp.112-115, 1988.

Jimenez, R.A. (1962). Behavior of Asphaltic Concrete Diaphragms to Repetitive Loads. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements.

Kennedy T. W. (1975). Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test. Asphalt paving technology. Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions. San Antonio, Texas, Vol 6, pp 132-149.

Kennedy T.W. y Hudson W.R. (1968). Application of the Indirect Tensile test to Stabilized Materials. Highway research Record N0.235, Highway Research Board, pp 36-48

Kennedy, T. W. and Anagnos, J. N. (1983). Procedures for the Static and Repeated-Load Indirect Tensile Tests. Research Record 183-14, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

Khattak, M. J.; Baladi, G. (1998). Engineering Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Record No. 1638, pp. 12-22.

Khattak, M. J.; Baladi, G. (2001). Fatigue and Permanent Deformation Models for Polymer-Modified Asphalt Mixtures. Transportation Research Record No. 1767, pp. 135-145

Khosla, N.P y Omer, M.S. (1985). Characterization of Asphaltic Mixtures for Prediction of Pavement Performance. TTR No.1034. Transportation Research Borrada.

Kim (y.r.), kim (n.) and khosla (n.p.). -Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete. ASTM STP 1147 - Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, Ed. Richard C. Meininger, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991

Kunst, P.A.J.C. (1989). Surface Cracking on Asphalt Layers, Working Committee B12, Hoevelaken, Holland.

LANAMME, REPORTE DE INVESTIGACIÓN LM- PI - PV- IN- 18 – 02 B; Análisis reológico de asfaltos modificados mediante el protocolo NCHRP 9-10; Costa rica, 2005

Lesueur (d.) and dekker (d.). -Fatigue resistance : What's wrong with the dissipated energy. Eurobitume Workshop - The rheology of bituminous binders - Bruxelles, april 1995.

Normas españolas NLT 350/90. Ensayo a fatiga en flexo tracción dinámica de mezclas bituminosas.

Majidzadeh, K., Kauffmann, E. M., and Ramsamooj, D. V. (1971). "Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue," Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 227-246.

McLean, D. B. (1974). Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.

Marsac (P.). -L'essai de module complexe au LCPC. Rapport interne, Section Matériaux de Chaussées, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 20p, 1992.

Miner M. A..- Cumulative Damage in Fatigue.- Transactions of American Society of Mechanical Engineers (ASME), Vol. 67.- USA, 1945.

Monismith, C. L. and Salam, Y. M. (1973). "Distress Characteristics of Asphalt

Concrete Mixes," Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists. 320-350.

Monismith, C.L., et al. (1975). "Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading". Transportation Research Record No. 537, pp. 1-38.

Pell, P. S. and Cooper, K. E. (1975). 'q'he Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials," Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44.

Pell, P. S. and Brown, S. F. (1972), "The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures," Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 326.

Pell (p.s.) and Taylor (i.f.). -Asphaltic road materials in fatigue. Journal of the Association of Asphalt Paving technologists (AAPT), Vol. 38, pp.371-422, 1967.

Pell (p.s.). -Fatigue characteristics of bitumen and bituminous Mixes. Proceeding of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1962.

Pérez Jiménez F.E., Cepeda Aldape J.B., Miró Recasens R., "Aplicación del Ensayo BTD para determinar la Energía de Fractura y el Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas", Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2001.

Pérez Jiménez F.E., Cepeda Aldape J.B., Miró Recasens R., "Análisis del Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas. Relación entre Tenacidad y Resistencia a la Fatiga", Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2001.

Pérez Jiménez F.E., "Ensayos Mecánicos de Mezclas Bituminosas", Jornadas Chileno-Española del Asfalto, Santiago, Chile, Abril 2001.

Piau (j.m.) and rousset (g.). -Modélisation de l'endommagement dans une éprouvette de sable bitumineux au cours d'une expérience de flexion alternée. Mémoire de DEA, Ecole Polytechnique, Paris, 1983.

Piau (J.M.) : "Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux", Bulletin de Liaison des LPC, n° 163, pp 41-54, septembre-octobre 1989.

Porter, B. P., and T. W. Kennedy (1975). Comparison of fatigue test methods for asphaltic materials. Research Report 183-4. Center for Highway Research, The University of Texas, Austin.

Pronk (a.c.). -Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements in the crack initiation phase. Research Report n° P. DWW-

95.001, Ministerie Van Verkeer en Waterstaat - Directoraat Generaal Rijkswaterstaat - Pays-Bas, 1995.

Publicación Técnica No. 139 Sanfandila, Qro, 2000; Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte; Efecto de la rugosidad de las carreteras en el daño a vehículos.

Raithby (K.D.) and Sterling (A.B.). -Some effects of loading history on the fatigue performances of rolled asphalt. TRRL Report L.R. 496 - U.K., 1972.

Rebala, S. R.; Estakhri, C. K. (1995). "Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Mixtures Designed Using TxDOT Mixture Design Method". Transportation Research Record No. 1515, pp. 1-10.

Reyes L, Fredy Ing PhD (2003). Profesor investigador de pavimentos, Director especialización en geotecnia vial y pavimentos de la Universidad Javeriana; Grupo CECATA. Universidad Javeriana, Diseño de pavimentos por el método Racional.

Rivière (N.). -Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux. Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Bordeaux I, 1996.

Roque R. y Buttlar, W.G. (1992). The Development of Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. Asphalt paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Proceedings of the Technical Sessions, St Louis, Missouri, Vol. 63, pp 305-332.

Rowe, G. M, S. F. Brown, P. S. Pell, and R. J. Armitage (1993a). Fatigue wheel tracking--validation studies, volume I. Report prepared for SHRP Project A-003A. SWK pavement Engineering Ltd., Nottingham, United Kingdom.

Rowe, G. M, S. F. Brown, P. S. Pell, and R. J. Armitage (1993b). Fatigue wheel tracking--validation studies, volume II. Report prepared for SHRP Project A-003A. SWK Pavement Engineering Ltd., Nottingham, United Kingdom.

Rowe, G. M, S. F. Brown, P. S. Pell, and R. J. Armitage (1993c). Fatigue wheel tracking--validation studies, volume III. Report prepared for SHRP Project A-003A. SWK Pavement Engineering Ltd., Nottingham, United Kingdom.

Salam, Y. IVI.(1971). Characteristics of Deformation and Fracture of Asphalt Concrete, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

Santucci, L. E. (1977). Thickness Design Procedure for Asphalt and Emulsified Asphalt Mixes. Vol. 1 Proceedings, Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, 424-456.

Shell Bitumes. -Bitumes, Techniques et Utilisations. , Ed. Société des Pétroles Shell, 1991.

Scholz, T., Hicks, R. G., and Scholl, L. (1989). Repeatability of Testing Procedures for Resilient Modulus and Fatigue. Report to Materials and Research Section, Oregon DOT, Oregon State University.

SHRP.- Fatigue Response of Asphalt Mixtures.- SHRP-A-312.- USA, 1994.

SHRP.- Fatigue Response of Asphalt - Aggregate Mixes.- SHRP-A-404.- USA, 1994.

Smith, K. D., et al. (1992). "Analysis of Concrete Pavements Subjected to Early Loading". Transportation Research Record No. 1370, pp. 1-10.

Sousa J. B. and Bronstein, M.,. Computer Software ATS—Testing System. SHRP Equipment Inc., Walnut Creek, Calif., 1987.

Stefani (C.). -Etude thermique des phénomènes de fatigue dans les matériaux composites bitumineux. Journées de Physique LCPC, Les Arcs, déc. 1981.

Stefani (c.). -Note interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées., nov.1993.

Tesoriere, G. Y Marino, S. (1990). Thermic Effects for Ruptura Tests at Indirect tensile test on Asphalt Concrete.Proceedings of the Fourth International Symposium Held by RILEM, Budapest, pp 320-328.

Tayebali, A.A. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures. Report A404, SHRP Project A003A. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

Vallerga, B.A., Morris, G.R. Huffman, J.E. and Huff, B.J. (1980). Applicability of asphalt-Rubber Membranes in Reducing Reflection Cracking. AAPT, Volume 49.

Van Dijk, W. (1975). "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes," Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, 38.

Verstraeten, J. (1972). "Moduli and Critical Strains in Repeated Bending of Bituminous Mixes, Application to Pavement Design," Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 729.

Verstraeten (j.) and Huet (J.) - Etude de résultats d'essais de compression diamétrale sur prélèvements routiers. Proceedings of the 3rd Eurobitume Symposium - The Hague, pp.133-138, 1985.

Von Quintus, H., Kennedy, T. W. I Epps, J. (1983). Operational and Performance Characteristics of Drum Mix Plants. Report No.FHWA-TS-83-202, Federal Highway Administration.

### **Páginas Web Consultadas**

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

<http://www.imt.mx>

<http://www.mfom.es>

<http://www.cedex.es>

<http://gulliver.trb.org>

<http://www.hotmix.org>

<http://www.asphaltisbest.com>

<http://www.asphaltinstitute.org>

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

<http://www.tfhrc.gov>

<http://www.dot.state.oh.us/pavement>