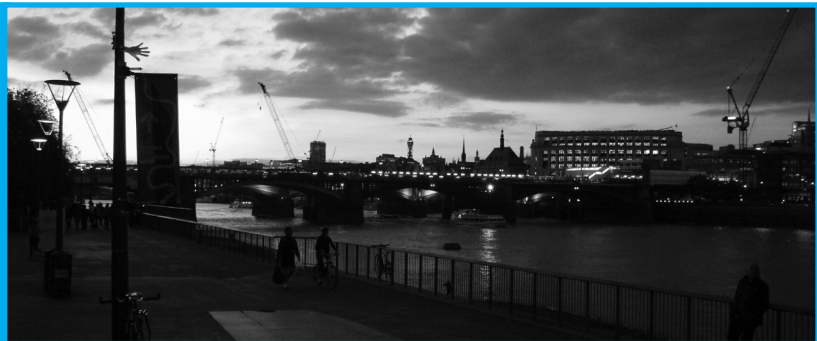


*Effect of temperature and
asphalt mixture type on
the fatigue behaviour of
flexible pavements*

Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles



Autores

VALDÉS, G. Universidad de la Frontera,
gvaldes@ufro.cl
Temuco, Chile

PÉREZ-JIMÉNEZ, F. Universidad Politécnica de Cataluña,
edmundo.perez@upc.edu
Barcelona, España

MARTÍNEZ, A. Universidad Politécnica de Cataluña,
adriana.martinez@upc.edu
Barcelona, España

Fecha de recepción 31/01/2012

Fecha de aceptación 09/04/2012

Resumen

Este artículo presenta un estudio experimental y analítico destinado a analizar la durabilidad de los pavimentos flexibles frente al fallo de fisuración por fatiga. Se evalúan las variables de temperatura ambiente, tipo de granulometría y ligante asfáltico utilizado en la fabricación de la mezcla. La fase experimental ha consistido en determinar el comportamiento a fatiga de una serie de mezclas asfálticas comúnmente utilizadas en capas de base, unas rígidas y otras más flexibles, con distintas granulometrías, las cuales son evaluadas a las temperaturas de 20°C y 5°C, para simular el comportamiento de los pavimentos en diferentes estaciones climáticas. Se presenta un análisis de la vida a fatiga de una estructura de pavimento flexible utilizando las leyes de fatiga y los módulos dinámicos, ambos obtenidos experimentalmente. Para este análisis, en función de las variables

evaluadas en este estudio, se ha realizado una modelación elástica multicapa de la estructura de pavimento con la finalidad de determinar los estados tensionales y de deformación requeridos para determinar la durabilidad a fatiga de la estructura bajo análisis. Los resultados obtenidos en este trabajo señalan que las mezclas con mayor contenido de finos en su granulometría presentan un mejor comportamiento frente al fallo por fisuración por fatiga, independiente del tipo de ligante y temperatura evaluada. Además se pudo establecer para las mezclas evaluadas que existe una mayor influencia en la vida a fatiga de pavimento por parte del aumento de la rigidez de las mezclas asfálticas en relación a la pérdida de la capacidad de deformación producida tanto por efectos de disminución de temperatura como por la utilización de ligantes más viscosos.

Palabras clave: Pavimentos asfálticos, fallo por fatiga, fisuración.

Abstract

This article presents an experimental and analytical study to evaluate the fatigue behavior of flexible pavements. Variables as temperature, gradation and asphalt binder type used in the asphalt mixture are evaluated. An experimental phase is carried out to evaluate the fatigue behavior of different types of asphalt mixtures. These mixtures are usually used in base layers of flexible pavements. Test temperatures considers 20°C and 5°C to simulate the pavements behavior in different seasons. Fatigue behavior of a pavement structure is evaluated through fatigue laws and dynamic modulus, both are

obtained experimentally. Multilayer elastic modeling is used to determine the stress and deformation states necessary to determine the fatigue life of the pavement structure under analysis. The results show a better fatigue performance of the pavement structure when higher fines content in the gradation are used in asphalt mixtures, regardless of binder type and temperature. Also, this research shows that the increased stiffness of asphalt mixtures has greater influence on the fatigue life of pavement than the loss of the ability to deform because of temperature decrease and use of more viscous binders.

Keywords: Asphalt pavement, fatigue distress, cracking.

1. Introducción

Los principales agentes solicitantes de los pavimentos son las cargas generadas por el tráfico y las condiciones ambientales a las que está expuesto el pavimento durante su puesta en servicio.

El tráfico solicitante es un factor de primera importancia a la hora de determinar o predecir el daño en el tiempo que sufrirá un pavimento en un periodo dado. Sin embargo, la caracterización de las solicitaciones producidas por el tráfico sobre los pavimentos es bastante compleja, debido no solo a la variabilidad y periodicidad de los vehículos que lo solicitan, sino también a las interacciones vehículo-pavimento y velocidades de circulación que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas de los vehículos (Brown *et al.*, 2001).

Por otra parte, las solicitaciones medioambientales tienen también una gran influencia en el comportamiento mecánico del pavimento. La temperatura es considerada uno de los agentes ambientales que influyen de manera directa en el comportamiento de los pavimentos, modificando su rigidez, debido a las características termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles. A medida que aumenta la temperatura, las capas del pavimento asfáltico se vuelven menos rígidas y cuando disminuye se incrementa la rigidez de estas capas (Roberts *et al.*, 1996). Este efecto se aprecia en mayor grado en las capas de rodadura, generando estados tensionales de origen térmico que se superponen a los generados por la acción del tráfico, lo que trae consigo un efecto en la durabilidad de la estructura (Pérez *et al.*, 2011). Sin embargo, a medida que la capa de mezcla se encuentra más profunda, como es el caso de las capas de base de mezcla asfáltica, las tensiones térmicas tienen un efecto despreciable en los estados tensionales del pavimento, influyendo la temperatura prácticamente solo en la rigidez de la mezcla (Nesnas y Nunn, 2004).

Consecuentemente el efecto de la matriz de áridos que conforma el esqueleto mineral de las mezclas asfálticas tiene un papel importante en la respuesta mecánica de las mezclas asfálticas frente a los fallos producidos por las solicitaciones de tráfico y medioambientales. Existe una influencia directa de la granulometría utilizada en el comportamiento del esqueleto mineral de las mezclas frente a las solicitaciones de carga, puesto que de acuerdo a su granulometría, estas aportan a la mezcla una rigidez diferente, y un comportamiento más o menos resistente a fallos por fisuración (Jagliardo, 2003, Myers *et al.*, 1998).

Otro aspecto considerado en la durabilidad de las estructuras de pavimento, y que tiene un efecto en el módulo de rigidez de sus capas, es el ligante asfáltico utilizado en la fabricación de la mezcla. Un ligante de mayor viscosidad o dureza permite conseguir mezclas más rígidas, pero a su vez más frágiles, mientras que un ligante de menor viscosidad o dureza, permite obtener mezclas más flexibles, pero menos rígidas (Pérez y Bardesi, 2006).

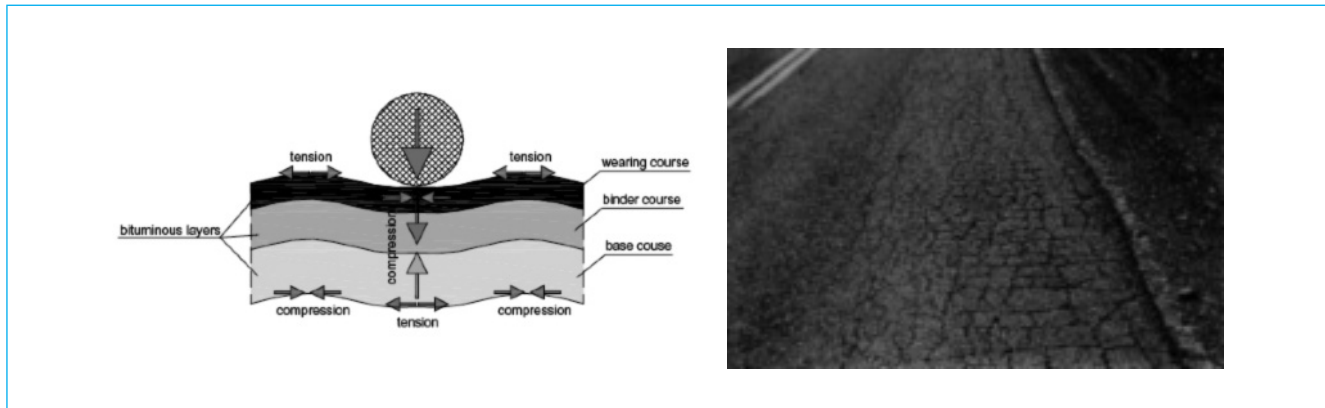
Tal como se ha señalado en los puntos anteriores, existe una importante influencia de temperatura ambiente en la rigidez de las capas asfálticas, y además, la granulometría y ligante utilizado en la fabricación de las mezclas influyen en el comportamiento y durabilidad de éstas.

En este contexto, uno de los deterioros en los pavimentos asfálticos más frecuentes que afectan la durabilidad de éstos, es el fallo por fatiga, también conocido como piel de cocodrilo, que se observa en la Figura 1. Este tipo de fallo ocurre generalmente en áreas del pavimento sujeta al impacto de numerosas y repetidas cargas por tráfico, principalmente en la zona de rodada de la calzada, en la cual la mezcla asfáltica de la capa inferior o capa de base asfáltica de la estructura, sufre un fatigamiento o pérdida paulatina de sus propiedades estructurales, producto de las cargas reiteradas que generan estados de tensiones y deformaciones en su fibra inferior (FHWA, 2003).

El fallo por fisuración por fatiga en las mezclas asfálticas es motivo de discusión en la literatura, puesto que existen investigadores que señalan que las mezclas más rígidas, sobre todo cuando éstas están expuestas a bajas temperaturas, se comportan con demasiada fragilidad, siendo más susceptibles a una fisuración rápida y brusca en condiciones de carga que la lleven a una deformación levemente mayor que la admitida. Sin embargo, las mezclas más dúctiles soportan mayores deformaciones, y por ende, son menos susceptibles a fisurarse a fatiga. Por otra parte, otras investigaciones indican el mejor comportamiento a fatiga de mezclas rígidas, cuando se utilizan en estructuras de pavimento en las capas intermedias y de base, o bien, cuando se utilizan en estructuras para tráfico liviano (Malan *et al.* 1989; Kandal y Parker, 1998; García *et al.*, 2009; Pérez y Bardesi, 2006; Jajliardo, 2003).

Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga ha sido y sigue siendo un motivo de estudio en las mezclas asfálticas y se ha representado por medio de una ley de fatiga, la cual se determina a través de los parámetros resultantes de ensayos cíclicos, aplicando un determinado criterio de fallo. La importancia de la ley de fatiga radica en que es una herramienta fundamental

Figura 1. Tensiones y deformaciones producidas por cargas de tráfico en las capas asfálticas del pavimento y pavimento fisurado severamente por fatiga



Fuente: Racanel et al., 2009; Pavement Tools Consortium

en el dimensionamiento de estructuras de pavimento mediante los actuales métodos de diseño mecanicistas.

De acuerdo a lo anterior, el presente artículo de investigación presenta un estudio experimental junto con un análisis de sus resultados, que aporta respuestas a las discusiones planteadas en la literatura. Los resultados obtenidos en laboratorio han sido utilizados y modelados en un sistema multicapa elástico de diseño mecanicista de pavimentos con el objetivo de evaluar la influencia que tienen las variables de temperatura ambiente, granulometría y tipo de ligante utilizado en la mezcla, en la durabilidad al fallo por fatiga en estructuras de pavimentos asfálticos, centrandose el análisis de estas variables en mezclas utilizadas en capas de base asfáltica, las que son más susceptibles al fallo por fatiga, tal como se observa en la Figura 1.

2. Enfoques de análisis del deterioro por fatiga en mezclas asfálticas

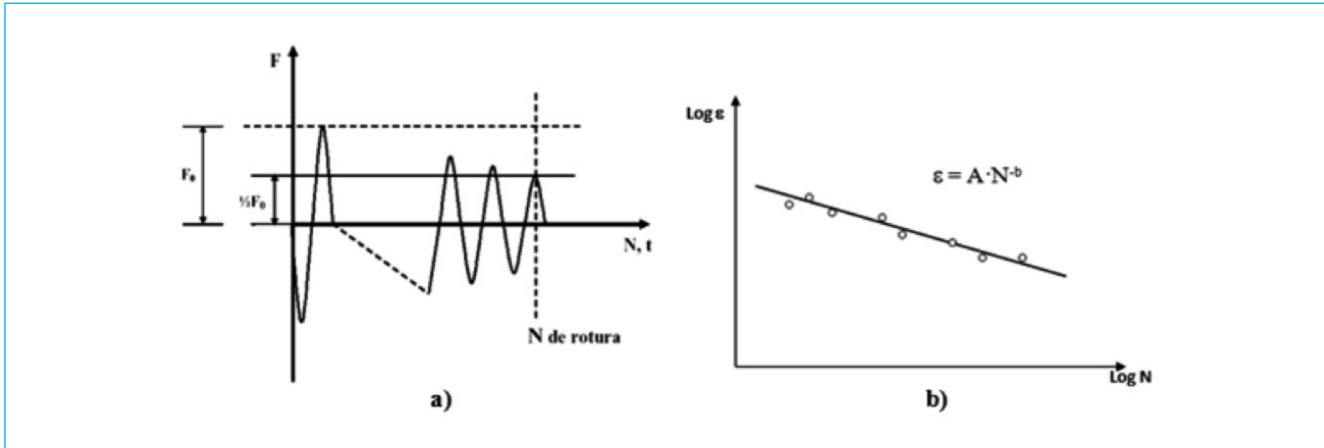
En ingeniería, y en especial, en la ciencia de materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce ante cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura, es decir, el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que se produce en un material a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material.

Uno de los criterios más ampliamente utilizados en la caracterización del comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas ensayadas en laboratorio, es el criterio clásico. Este criterio considera la rotura de la probeta cuando la rigidez de la mezcla alcanza la mitad del valor que tenía inicialmente. Para ensayos controlados por deformación o desplazamiento, la rotura o fallo de la probeta se producirá en el ciclo en que la carga inicial, F_0 , se reduzca a la mitad de la misma, $F_0/2$, tal como se observa en la Figura 2a.

La ley de fatiga tiene por objeto caracterizar el comportamiento de una determinada mezcla asfáltica sometida a una carga cíclica y es obtenida a partir del ensayo de múltiples probetas a diferentes niveles de desplazamiento y/o deformación controlada. Cada ensayo entrega un punto dentro de la ley de fatiga de la mezcla asfáltica, tal como se observa en la Figura 2b. Esta última se determina relacionando las deformaciones máximas iniciales producidas en el centro de la probeta, con el número de ciclos necesarios para reducir la rigidez de la probeta a la mitad, obteniendo pares de valores correspondientes a varios ensayos a diferentes amplitudes de desplazamiento, que permiten definir la ley de fatiga en deformación con control en desplazamiento.

Estudios llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña mediante una serie de ensayos a fatiga, entre los que se encuentran el ensayo a flexotracción en tres puntos, han permitido establecer un nuevo criterio de fallo por fatiga llamado (Pérez et al., 2007). Los resultados

Figura 2. a) Criterio clásico de fallo por fatiga. Ensayo controlado por desplazamiento.
 b) Ley de Fatiga en ensayos de desplazamiento controlado en mezclas asfálticas

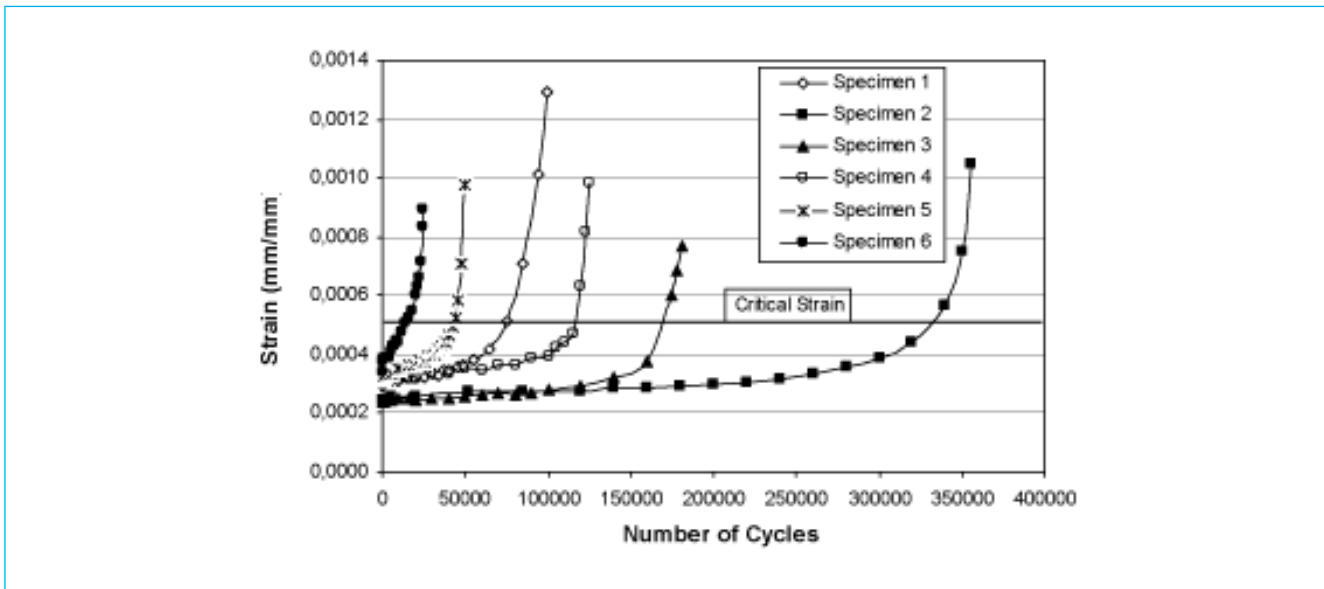


Fuente: Racanel et al., 2009; Pavement Tools Consortium

obtenidos de la aplicación de estos ensayos en su modalidad dinámica han puesto de manifiesto que en un ensayo de fatiga a tensión o desplazamiento controlado, al ir aumentando el número de ciclos aumenta la deformación producida y existe un nivel

de deformación a partir del cual el proceso de fatiga se propaga rápidamente (), independientemente del estado de tensiones a que ha estado sometida la probeta durante su proceso de fatiga, tal como se observa en la Figura 3. Lo anterior se traduce en que

Figura 3. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a flexotracción



Fuente: Pérez et al., 2007.

si se aplica una tensión grande, la deformación inicial producida será mayor y ésta irá aumentando en cada aplicación de carga hasta llegar a la que es cuando el proceso de fatiga acelerará hasta la rotura del material. Por otra parte, si se aplica una carga pequeña esta deformación será menor, pero aumentará igualmente en cada aplicación de carga hasta un nivel de deformación igual al caso anterior (deformación crítica), a partir del cual la fisura progresa rápidamente hasta la rotura del material.

3. Descripción del estudio experimental

El plan de trabajo experimental se desarrolló con la finalidad de analizar el comportamiento de mezclas asfálticas, comúnmente utilizadas en capas de base de estructuras de pavimento, respecto a las variables: temperatura ambiente, granulometría y tipo de ligante asfáltico utilizado en la mezcla. Los resultados obtenidos de la fase experimental fueron analizados y se utilizaron en la modelación de estructuras de pavimento con la finalidad de realizar un análisis de sensibilidad respecto de cómo estas variables evaluadas afectan en la durabilidad a fatiga de las estructuras de pavimento.

3.1. Materiales utilizados

Las mezclas asfálticas evaluadas en este estudio experimental se fabricaron con las granulometrías de áridos especificadas en la normativa española para capas

de base asfáltica de estructuras de pavimento. Estas fueron las correspondientes a los tipos gruesas y semi-densas, con un tamaño máximo del árido de 20 mm, denominadas G-20 y S-20, respectivamente (Tabla 1). Ambas mezclas se fabricaron con ligantes asfálticos de diferente dureza, un ligante de penetración 60/70 dm, utilizado generalmente en mezclas convencionales, y un ligante de penetración 13/22 dm, utilizado más frecuentemente en mezclas de módulo elevado, Tabla 2.

3.2. Ensayo a fatiga

El procedimiento para determinar el comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas en la fase experimental fue el que se encuentra recogido en la actual normativa europea UNE-EN 12697-24 en el anexo C. Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a una carga cíclica, en un ensayo de fatiga por flexión en tres puntos, utilizando probetas prismáticas. El procedimiento consiste básicamente en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía con el tiempo según una función sinusoidal, de forma: $D = D_0 \sin(2\pi Ft)$, hasta el fallo de la probeta, como se observa en la Figura 4.

Para la realización del ensayo se utiliza una prensa servohidráulica de alta precisión MTS (Material Testing System) que dispone de una cámara ambiental capaz de controlar la temperatura con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ y un equipo de adquisición de datos.

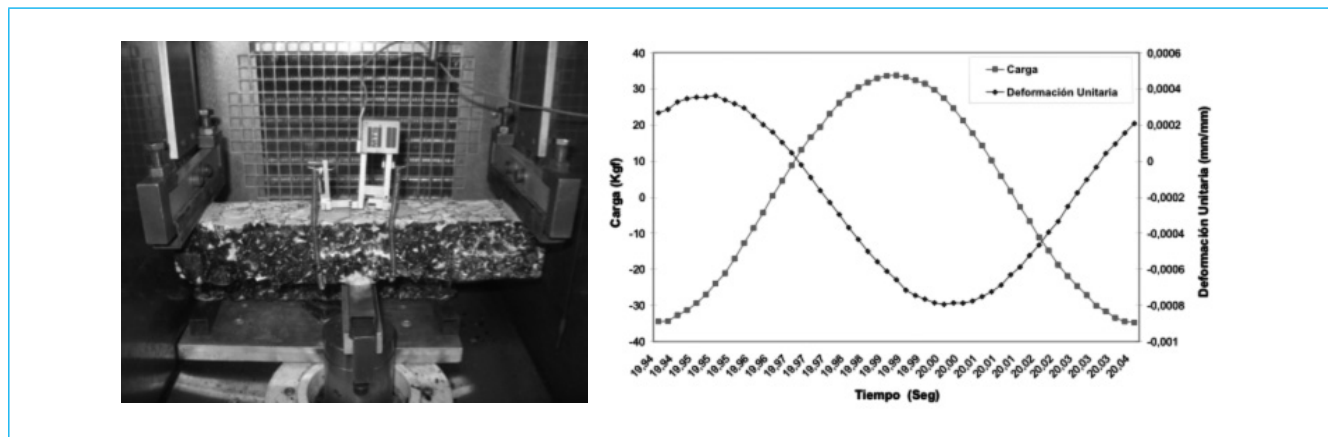
Tabla 1. Granulometrías de mezclas utilizadas en el estudio experimental

Tamaño Tamiz UNE	Mezcla S-20			Mezcla G-20		
	Banda inf.	Banda sup.	PASA (%)	banda inf.	banda sup.	PASA (%)
25	100	100	100	100	100	100
20	80	95	87,5	75	95	75
12,5	64	79	71,5	55	75	55
8	50	66	58	40	60	40
4	35	50	42,5	25	42	25
2	24	38	31	18	32	19
0,5	11	21	16	7	18	10
0,25	7	15	11	4	12	7
0,125	5	10	7,5	3	8	6
0,063	3	7	5	2	5	5

Tabla 2. Propiedades de los ligantes empleados en la fase experimental de la investigación

Características del asfalto	Unidad	B13/22	B60/70
Penetración (25°C; 100 g; 5s)	0,1 mm	17	64
Índice de penetración	–	0,1	–0,2
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	67,3	51,7
Punto de fragilidad Fraass	°C	–5	–17
Ductilidad a 25°C	cm	15	>100
Viscosidad dinámica 60°C	(Pa,s)	4 551	367
Viscosidad dinámica 135°C	(Pa,s)	1,92	0,56
Residuo RTFOT			
Pérdida de masa	%	0,35	0,5
Penetración (25°C; 100 g; 5s)	% p,o,	10	32
Incremento en el punto de reblandecimiento	°C	7,5	9,6
Ductilidad a 25°C	cm	7	50

Figura 4. Ensayo de fatiga de viga a flexotracción en tres puntos.



El módulo dinámico en un determinado ciclo se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión y la amplitud cíclica de la función deformación. La amplitud cíclica de una función en un ciclo es el valor absoluto de la diferencia entre su valor máximo y su valor mínimo en ese ciclo. Este parámetro se calcula mediante la Ecuación 1.

Para la obtención de la ley de fatiga se consideran los pares de valores: mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo número 200, $\frac{1}{2}[\epsilon_c(200)]$, y el número total de ciclos aplicados (N). Luego, mediante una aproximación por mínimos cuadrados se obtiene la ley de fatiga, Ecuación 2.

$$MD = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} \quad (1)$$

Donde,

MD : Módulo dinámico, MPa.
 σ_c : Amplitud cíclica del esfuerzo, MPa.
 ϵ_c : Amplitud cíclica de la deformación.

$$\epsilon = A \cdot N^{-b} \quad (2)$$

Donde,

ϵ : Deformación unitaria inicial.
 N: Número de aplicaciones de carga hasta el fallo por fatiga.
 A, b: Parámetros de la ley de fatiga dados por la regresión lineal realizada.

3.3 Plan experimental

El plan de trabajo propuesto para la fase experimental, consistió en el estudio del comportamiento a fatiga

de las mezclas asfálticas G-20 y S-20, fabricadas con ligantes de diferente dureza y evaluadas a distintas temperaturas. Los ensayos experimentales de fatiga se efectuaron a las temperaturas de 5 y 20°C, representándose así a dos diferentes condiciones ambientales estacionales representativas de un clima mediterráneo a las que puede estar sometida una estructura de pavimento durante su periodo en servicio. En la Tabla 3 se observa un esquema de las variables analizadas en esta fase experimental.

4. Análisis de resultados experimentales

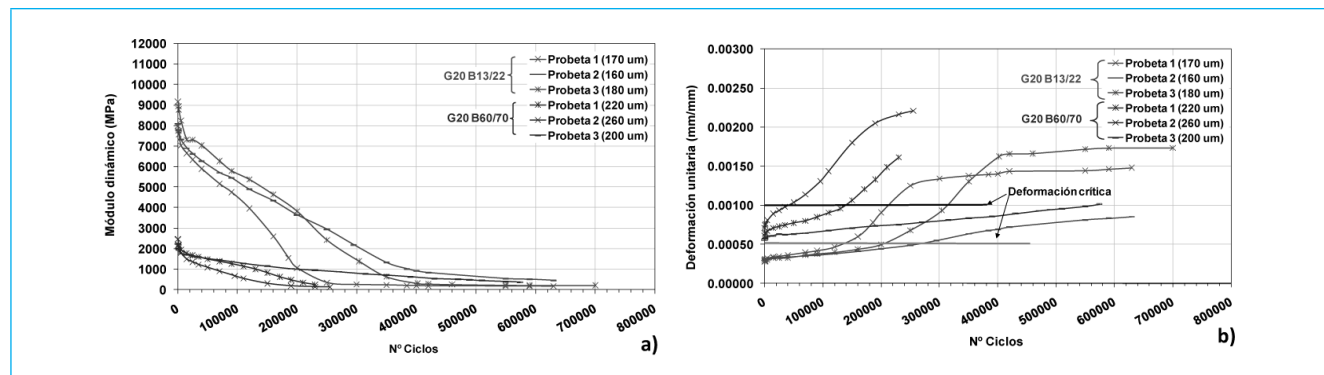
4.1 Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas evaluadas

La evolución del módulo dinámico con los ciclos de aplicación de carga, para la temperatura de 20°C, se representa en la Figura 5a. Como puede observarse, las mezclas más rígidas, confeccionadas con el ligante de penetración 13/22 dm, presentan módulos dinámicos iniciales entre 7.500 y 11.500 MPa,

Tabla 3. Variables analizadas en ensayo de fatiga a flexotracción

Tipo de Mezcla	Contenido de ligante (%) s/a	Tipo de ligante utilizado	Temperatura de ensayo (°C)
S-20	5	B60/70 B13/22	20 y 5
G-20	5	B60/70 B13/22	20 y 5

Figura 5. Ensayo a fatiga a flexotracción, mezcla G-20, T= 20°C. a) Evolución módulo dinámico. b) Deformación crítica



muy superiores a los de la mezcla más deformable, fabricada con el ligante B60/70, que obtuvo valores cercanos a los 2.500 MPa. Asimismo, se observa que las curvas de evolución del módulo dinámico muestran un rápido descenso a partir del ciclo en que la probeta alcanza el valor de deformación crítica, ilustrado en la Figura 5b. Adicionalmente, se aprecia que las pendientes de las curvas de evolución del módulo dinámico son mayores para las mezclas más rígidas; en cambio, para la mezcla más deformable, fabricada con el ligante de penetración 60/70 dm, la pendiente es más tendida, presentando una degradación más paulatina.

En la Figura 6b se representa la evolución de la deformación unitaria con respecto a los ciclos de carga para el ensayo a fatiga realizado a la temperatura de 5°C. Ambas mezclas, la más rígida fabricada con el ligante de penetración 13/22 dm y la más flexible fabricada con el ligante de penetración 60/70 dm, presentan una baja deformación inicial, siendo mayor la de la mezcla fabricada con el ligante de mayor penetración. A su vez, el valor de deformación crítica para ambas mezclas se reduce respecto a sus símiles ensayadas a 20°C, observándose así una pérdida, por parte del material, de su capacidad de admitir deformación. En relación a la evolución del módulo dinámico representado en la Figura 6a, se puede observar, al igual que en el ensayo de fatiga realizado a 20°C, un rápido descenso a partir del ciclo en el que la probeta alcanza la deformación crítica, y que sus valores iniciales son mayores en la mezcla fabricada con el ligante de menor penetración, B13/22, lo que demuestra la alta fragilidad de este tipo de mezcla a

bajas temperaturas, con respecto a la fabricada con el ligante de mayor penetración, B60/70.

4.2 Leyes de fatiga

Las leyes de fatiga de las mezclas evaluadas fueron obtenidas relacionando la deformación máxima inicial producida en el centro de la probeta con el número de ciclos necesario para reducir la rigidez o módulo a la mitad de su valor inicial. Con esto, se obtuvieron pares de valores correspondientes a diferentes amplitudes de desplazamiento aplicados a cada una de las probetas, permitiendo así, una vez trazada la línea de tendencia para los diferentes pares de valores, obtener la ley de fatiga con control de desplazamiento para cada una de las mezclas evaluadas a diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos en la fase experimental para las mezclas fabricadas con los ligantes de alta y baja viscosidad, B13/22 y B60/70, evaluadas a las temperaturas de 5 y 20°C se pueden observar en las Figuras 7 y 8, clasificándose por tipo de mezcla, gruesa y semidensa, respectivamente.

La influencia de la temperatura de ensayo, evaluada en las mezclas G-20 y S-20, muestra una respuesta muy similar en ambos tipos de mezcla, Figuras 7 y 8. Cuando éstas fueron fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, se observa una clara pérdida de capacidad de deformación, entre las temperaturas de 20 y 5°C, puesto que para igual número de ciclos, es la mezcla ensayada a 20°C la que admite una mayor deformación. Sin embargo, las mezclas fabricadas con el ligante de menor penetración, B13/22, debido a su

Figura 6. Ensayo a fatiga a flexotracción, mezcla S-20, T= 5°C.
a) Evolución módulo dinámico. b) Deformación crítica

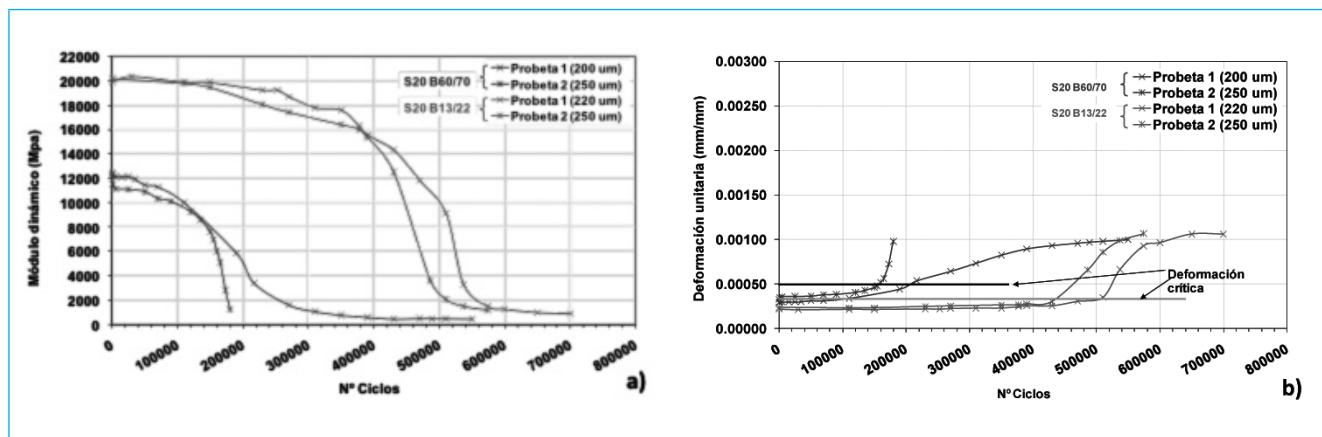


Figura 7. Leyes de fatiga mezcla gruesa tipo G-20 a 5 y 20°C, ligantes de penetración 13/22 y 60/70 dm

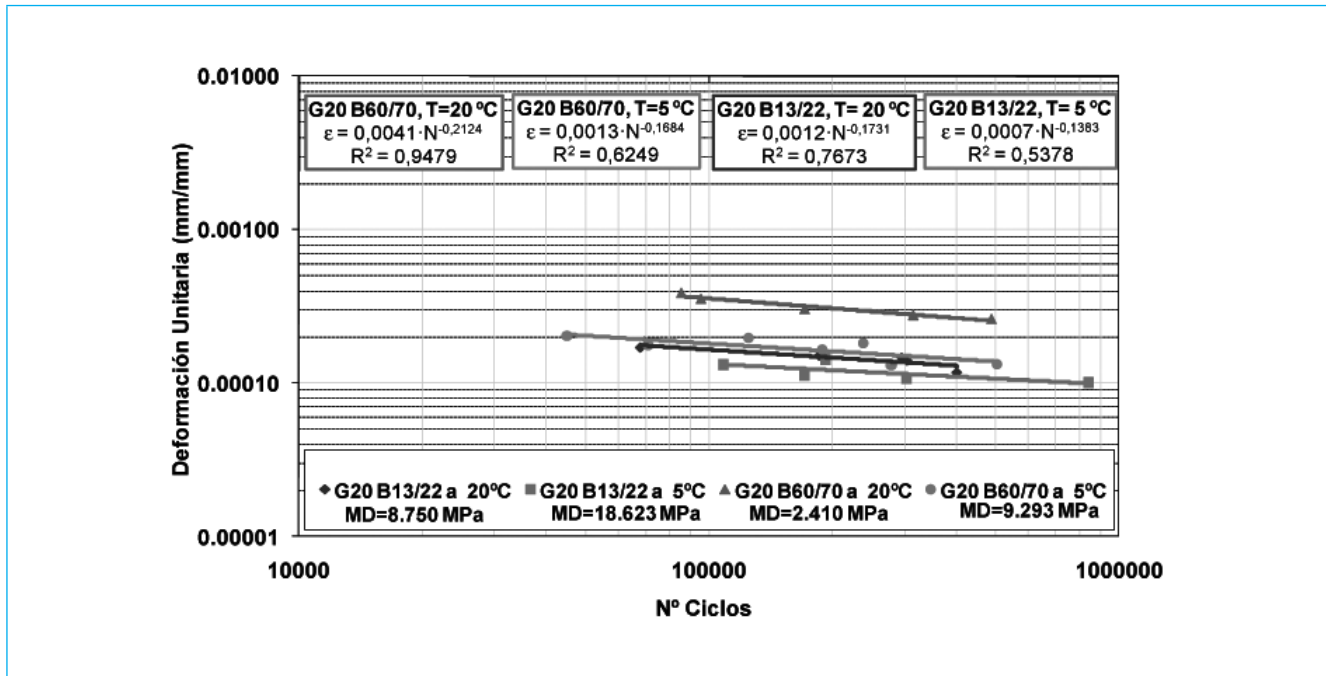
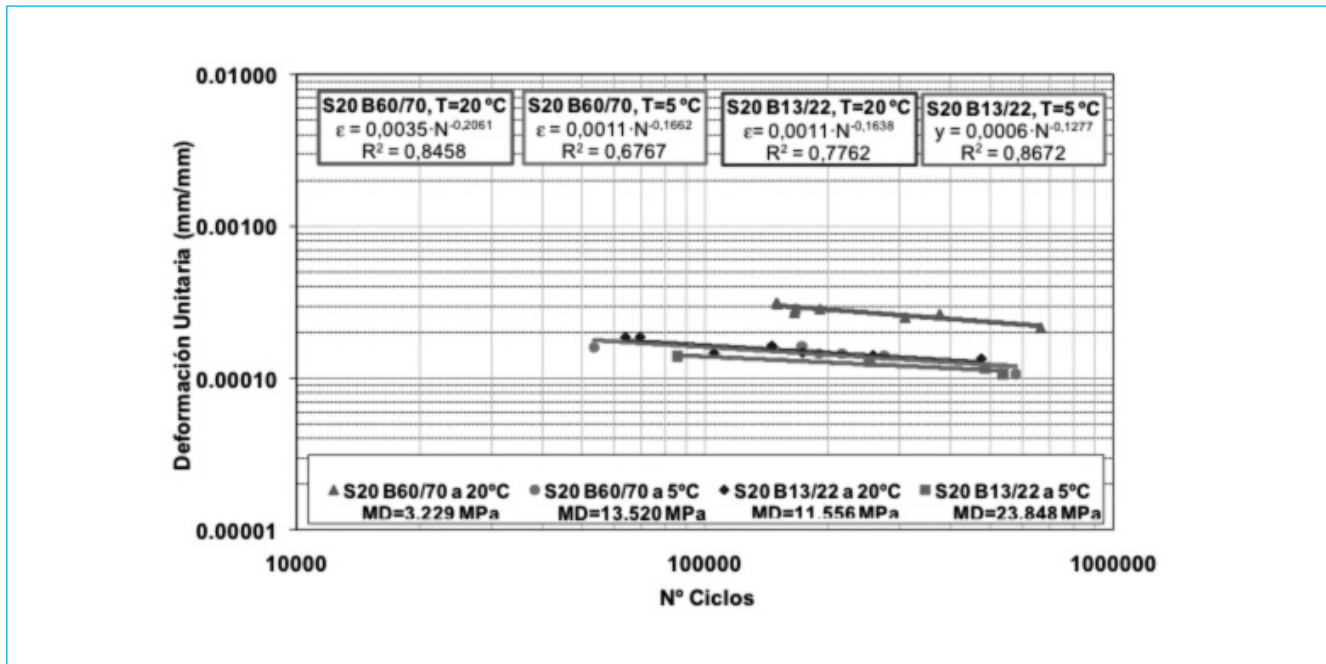


Figura 8. Leyes de fatiga mezcla semidensa tipo S-20 a 5 y 20°C, ligantes de penetración 13/22 y 60/70 dm



alta rigidez, presentan una menor diferencia entre los valores de deformación a igual número de ciclos, para las dos temperaturas evaluadas.

Adicionalmente, en las figuras se observa que aquellas mezclas que obtuvieron un mayor módulo dinámico, S-20 B13/22 y G-20 B13/22 a 5°C, fueron las que obtuvieron una menor pendiente de la ley de fatiga, parámetro "b" de la ley de fatiga, siendo más susceptibles en su vida a fatiga frente a pequeñas deformaciones. De manera opuesta, las mezclas que obtuvieron los menores valores de módulo dinámico, S-20 B60/70 y G-20 B60/70, fueron las que obtuvieron una mayor pendiente en la ley de fatiga.

Por otra parte, las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración B60/70 y ensayadas a 20°C obtuvieron un mayor valor en el parámetro "A" de la ley de fatiga (o deformación en el ciclo 1 del ensayo de fatiga) que las mezclas fabricadas con el ligante más duro, B13/22, ensayadas a la misma temperatura. Esto indica la mayor deformación inicial de estas mezclas. A su vez, aquellas ensayadas a 5°C presentaron un comportamiento frágil, con un bajo valor del parámetro "A" de la ley de fatiga.

5. Evaluación de la vida a fatiga de estructuras de pavimento

5.1 Cálculo analítico de la vida a fatiga de diferentes secciones estructurales

Se han desarrollado numerosos códigos computacionales que permiten modelar el comportamiento de las estructuras de pavimentos mediante un análisis multicapa elástico de los materiales que las componen.

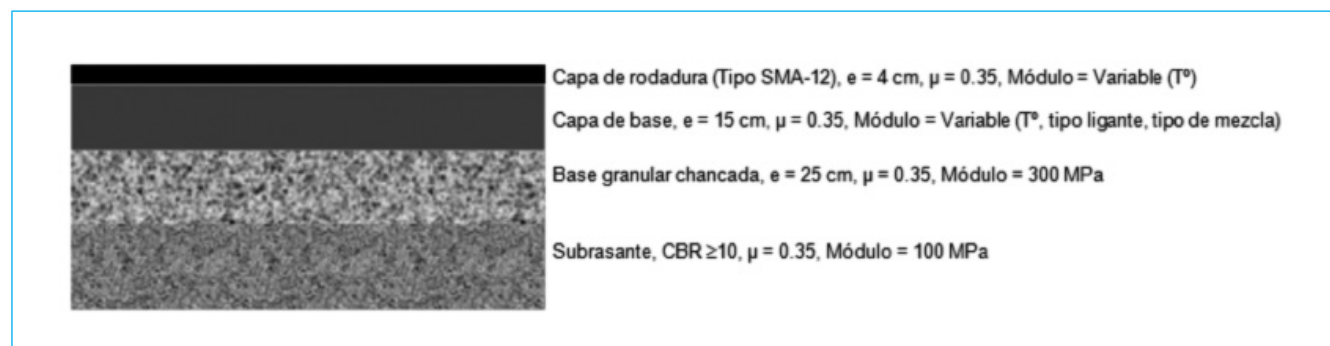
Entre ellos están KENLAYER, DARWIN, AASHTO, ECÓ-ROUTE y BISAR 3.0, entre otros. El código que ha sido empleado en este estudio es el BISAR 3.0. Los parámetros de diseño utilizados fueron los correspondientes al eje equivalente en el dimensionamiento de pavimentos por métodos mecanicistas:

- Eje simple de 80 kN
- Carga vertical de una rueda gemela 20 kN
- Área circular equivalente de radio 10,5 cm

La estructura considerada para el análisis está compuesta por una capa base de mezcla asfáltica de 15 cm, 25 cm de una base granular chancada estabilizada y una explanada o subrasante con un $CBR \geq 10\%$, tal como se ilustra en la Figura 9. Además, con la finalidad de disminuir posibles efectos de tensiones térmicas se consideró en este análisis una capa de rodadura de 4 cm compuesta por una mezcla tipo SMA (Stone Mastic Asphalt), cuyos módulos fueron medidos experimentalmente (Pérez y Valdés, 2009). En esta estructura variaron las condiciones de la mezcla asfáltica de capa de base, puesto que es la solicitada a fatiga. Estas variaciones se realizaron según los resultados obtenidos en la fase experimental en las diferentes mezclas, de acuerdo a su granulometría (densa o semidensa), temperatura (20 y 5°C) y ligante utilizado (B60/70 y B13/22). Como resultado se pudo comparar la influencia de estas variables en el comportamiento o vida a fatiga de la estructura de pavimento analizada.

Los parámetros críticos considerados en el análisis a fatiga de las secciones de la estructura evaluada fueron el colapso por compresión de la explanada o subrasante y el fallo por tracción en la capa asfáltica de base. El fallo de la explanada o subrasante está relacionado con la deformación vertical que llega a la coronación de la estructura. El segundo fallo a evaluar

Figura 9. Estructura de pavimento a evaluar con los parámetros de diseño



es el que se produce por efectos de fatiga en la capa asfáltica de base, y está relacionado con las tensiones y deformaciones tangenciales desarrolladas producto de las repetidas cargas del tráfico en la fibra inferior de esta capa.

Para el análisis de las capas asfálticas de base se utilizaron los módulos dinámicos y las leyes de fatiga obtenidas experimentalmente ilustradas en las Figuras 7 y 8, dependiendo del tipo de mezcla, ligante utilizado y temperatura de ensayo. Mientras que para el análisis de la explanada o subrasante, se utilizó la ley de fatiga propuesta por Edwards y Valkering, señalada en la Ecuación 3.

$$N = 6,146 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon_z^{-4} \quad (3)$$

Donde,

N: Número de ciclos de carga admisibles.

ε_z : Deformación vertical por compresión de la subrasante.

5.2 Análisis de resultados del cálculo analítico de la vida a fatiga

El efecto de las variables temperatura ambiente, granulometría de la mezcla y tipo de ligante en la vida a fatiga de una estructura de pavimento flexible se puede observar en la Tabla 4 y Figura 10. Para ello se evaluó la resistencia a fatiga de 8 secciones de la estructura señalada en la Figura 9, todas con las mismas dimensiones (4 cm de mezcla SMA-12, 15 cm de mezcla para capa de base y 25 cm de base granular sobre una subrasante con CBR superior a 10), pero en cada sección se varió el valor de los módulos dinámicos y leyes de fatiga de la capa asfáltica de base, de acuerdo a los resultados obtenidos en la fase experimental.

Estos fueron por tipo de granulometría de la mezcla utilizada (gruesa y semidensa), temperatura ambiente (20 y 5°C) y tipo de ligante utilizado (B60/70 y B13/22), Figuras 7 y 8.

En la Tabla 4 se observa como en todas las secciones evaluadas el fallo por fatiga producido en la estructura ocurre antes por las deformaciones por tracción de la capa asfáltica de base que por deformaciones por compresión en la capa de subrasante, resistiendo un menor número de ciclos de carga en la capa de base asfáltica.

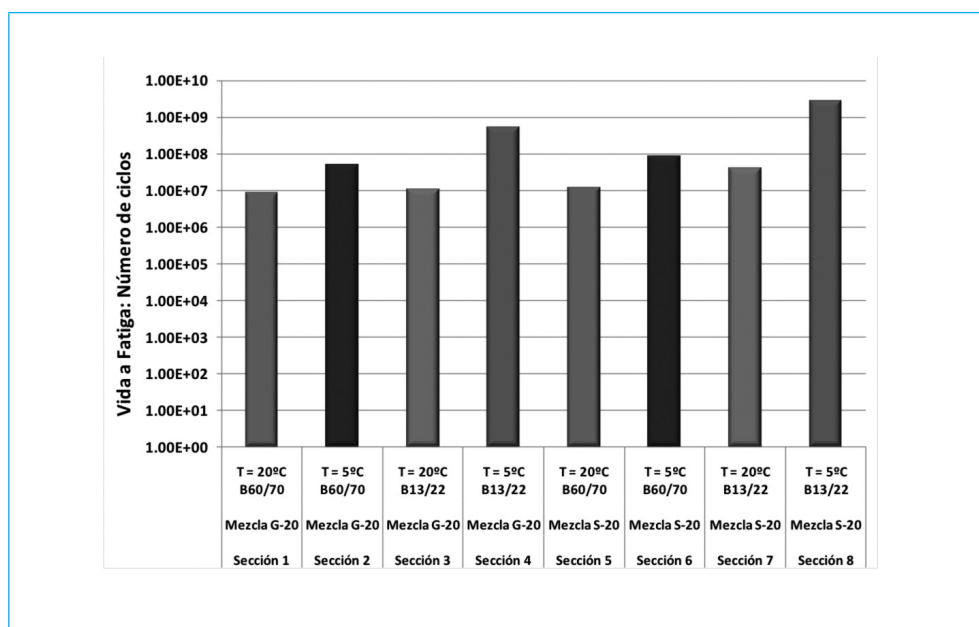
El análisis efectuado en función del tipo de granulometría utilizada en la mezcla de la capa de base, gruesa o semidensa, los resultados muestran que en igualdad de condiciones de temperatura, contenido y tipo de ligante utilizado, es la mezcla semidensa la que obtiene una mayor durabilidad a fatiga para la misma estructura evaluada. Este efecto, que se observa más claramente en la Figura 10 y se puede atribuir al mayor contenido de material fino de la mezcla semidensa (S-20), que se observa en granulometría utilizada señalada en la Tabla 1. El mayor contenido de material fino proporciona a la mezcla una mayor cantidad de mástico asfáltico, concordando con lo determinado en otras investigaciones desarrolladas, donde se señala que al disminuir el volumen intragranular entre partículas en una mezcla asfáltica aumenta la resistencia al fallo por fisuración por fatiga (Jajliardo 2003, Harvey y Tsai, 1996).

El efecto de la temperatura en la resistencia al fallo por fatiga de las mezclas evaluadas se observa claramente en la Tabla 4 y Figura 10. Para ambos tipos de mezcla, gruesa y semidensa, fabricada con ambos tipos de ligantes de diferente viscosidad, B60/70 y B13/22, se observa como el descenso de temperatura de 20 a 5°C,

Tabla 4. Comparación de la vida a fatiga considerando las variables evaluadas

	Espesor	μ	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5	Sección 6	Sección 7	Sección 8
			Mezcla G-20 T = 20°C B60/70	Mezcla G-20 T = 5°C B60/70	Mezcla G-20 T = 20°C B13/22	Mezcla G-20 T = 5°C B13/22	Mezcla S-20 T = 20°C B60/70	Mezcla S-20 T = 5°C B60/70	Mezcla S-20 T = 20°C B13/22	Mezcla S-20 T = 5°C B13/22
			Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	Módulo (MPa)
SMA-12	4 cm	0.35	4534	9822	4534	9822	4534	9822	4534	9822
Mezcla capa base (Mcb)	15 cm	0.35	2410	9293	8750	18623	3229	13520	11556	23848
Base granular	25 cm	0.35	300	300	300	300	300	300	300	300
Subrasante CBR \geq 10		0.35	100	100	100	100	100	100	100	100
Resultados del estudio a fatiga mediante el cálculo analítico										
Deformación tangencial Mcb			1.385E-04	6.557E-05	7.300E-05	4.355E-05	1.214E-04	5.280E-05	6.225E-05	3.736E-05
Deformación vertical Subrasante			2.868E-04	1.850E-04	2.109E-04	1.495E-04	2.697E-04	1.658E-04	1.935E-04	1.371E-04
Número de ciclos fatiga Mcb			8.456E+06	5.050E+07	1.057E+07	5.260E+08	1.211E+07	8.605E+07	4.116E+07	2.767E+09
Número de ciclos fatiga subrasante			1.478E+14	8.537E+14	5.055E+14	2.002E+15	1.890E+14	1.323E+15	7.133E+14	2.830E+15

Figura 10. Vida a fatiga de las secciones estructurales evaluadas



afecta en el aumento del valor del módulo de rigidez de cada uno de los tipos de mezcla, aumentando de esta manera la capacidad estructural de la sección de pavimento evaluado, y que de acuerdo a las leyes de fatiga obtenidas en la fase experimental, aumenta el valor de número de ciclos de carga que soporta la estructura. Estos resultados obtenidos muestran a su vez, que el aumento de módulo de rigidez producto de la disminución de la temperatura es más influyente en la vida a fatiga que la baja en la capacidad de deformación que admiten estas mezclas producto de este descenso de temperatura, efecto que se observa en las leyes de fatiga de las Figuras 7 y 8.

Ahora bien, si se analizan las secciones de estructuras con iguales tipos de mezclas y temperaturas de evaluación, variando solamente el tipo de ligante asfáltico utilizado en la fabricación de las mezclas, se observa en la Tabla 4 y Figura 10 que las estructuras que incorporan en su capa de base mezclas fabricadas con el ligante de mayor viscosidad, B13/22, presentaron una mayor resistencia al fallo por fatiga que aquellas que utilizaron el ligante menos viscoso, B60/70. En este caso, al igual que en el análisis de la temperatura, se observa que el aumento de módulo de rigidez producto de la mayor dureza del ligante utilizado en la fabricación de la mezcla de capa de base influye más en la vida a fatiga de la estructura analizada que la baja en la capacidad de deformación para igual

número de ciclos que admiten estas mezclas producto de la mayor rigidez, lo cual se observa en las leyes de fatiga ilustradas en las Figuras 7 y 8.

6. Conclusiones

Las leyes de fatiga determinadas experimentalmente señalan que las mezclas asfálticas más rígidas poseen una menor pendiente de la ley de fatiga, lo que las hace altamente frágiles y mayormente susceptibles en su vida a fatiga frente a pequeñas variaciones en la deformación. Por el contrario, las mezclas menos rígidas poseen un mayor rango de deformación otorgándoles más flexibilidad.

Las mezclas con mayor contenido de finos en su granulometría presentaron un mejor comportamiento frente al fallo por fisuración por fatiga, independientemente del tipo de ligante y temperatura ambiental evaluada.

En la estructura de pavimento evaluada se determinó que existe una mayor influencia en la vida a fatiga por parte del aumento de la rigidez de las mezclas en relación a la pérdida de la capacidad de deformación, tanto por efectos de descenso de temperatura ambiental como por utilización de ligantes más viscosos.

Referencias

1. Brown R., Kandhal P. and J. Zhang. (2001). Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCAT Report 01-05, National Center for Asphalt Technology. USA.
2. Federal Highway Administration. (2003). Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program, Publication N° FHWA-RD-03-031, USA.
3. García J., García C., Buisson J., Cortés C. y J. Potti. (2008). Pavimentos de larga duración. VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid.
4. Harvey J. and B. Tsai. (1996). Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness, Transportation Research Record, National Research Council, Washington, DC, N° 1543, pp. 38-45.
5. Jajliardo A. (2003). Development of Specification Criteria to Mitigate Top-Down Cracking. Master Thesis of Engineering, University of Florida, USA.
6. Kandhal P. and F. Parker. (1998). The Aggregates' Role in HMA Performance, Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements, NCHRP Program, Report 405. USA.
7. Malan G., Straus P. and F. Hugo. (1989). A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 58, pp. 142-162.
8. Myers L., Roque R. and B. Ruth. (1998). Mechanisms of Surface-Initiated Longitudinal Wheel Path Cracks in High-Type Bituminous Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 67, pp. 401-432.
9. Nesnas K. and M. Nunn. (2004). A Model For Top-Down Reflection Cracking in Composite Pavements, Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, pp. 409-416.
10. Pérez F., Valdés G., Miró R., Botella R and J. Campana. (2011). Effect of Thermal Stresses on Fatigue Behavior of Bituminous Mixes. Paper 11-2410, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, USA.
11. Pérez F. y A. Bardesi. (2006). Manual para la Caracterización de Ligantes y Másticos Bituminosos, Ediciones Repsol YPF, España.
12. Pérez-Jiménez, F., Miro, R. and A. Martínez. (2007). Analysis of the Fatigue Process in Bituminous Mixes. Fatigue Critical Strain. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, USA.
13. Pérez F. y G. Valdés. (2009). Evaluación de velocidades de aplicación de carga, temperatura y contenido de ligante en el módulo de rigidez de mezclas bituminosas convencionales y de alto módulo en pavimentos aeroportuarios. Informe INECO-TIFSA. Barcelona.
14. Racanel C., M. Romanescu, M. Dicu, A. Burlacu and C. Surlea. (2009). Fatigue Lines for Asphalt Mixtures used in Wearing Course. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.2, pp. 795-805.
15. Roberts F., Kandhal P., Ray E., Lee D., Kennedy T. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA Education Foundation, Second Edition. USA.