

Evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C.

Evaluation of mechanical parameters of an asphalt mixture under the environmental conditions of Bogotá D.C.

Hugo Alexander Rondón Quintana*¹, Fredy Alberto Reyes Lizcano**

* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C. COLOMBIA

** Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. COLOMBIA

Fecha de recepción: 22/ 08/ 2011
Fecha de aceptación: 13/ 03/ 2012
PAG. 57 - 74

Resumen

El artículo presenta el cambio que experimenta el módulo resiliente, la deformación permanente y la resistencia a fatiga de una mezcla de concreto asfáltico cuando es expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) durante 47-48 meses. Las mezclas fueron fabricadas utilizando dos cementos asfálticos (CA) fabricados en Colombia: CA 80-100 y CA 60-70. La tendencia general de las mezclas con el tiempo de exposición es experimentar un aumento en los valores de rigidez debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. El aumento en rigidez genera incremento en la resistencia al fenómeno de ahuellamiento y en la vida de fatiga de la mezcla analizada cuando ésta sea utilizada para conformar capas asfálticas gruesas en el pavimento. Con base en la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al medio ambiente se propone una ecuación para predecir de manera aproximada el cambio que experimenta la vida a fatiga de la mezcla.

Palabras Clave: Módulo resiliente, ley de fatiga, envejecimiento, mezcla asfáltica densa en caliente, cemento asfáltico

Abstract

The present paper introduces the evolution of resilient modulus, permanent strain and fatigue life of an asphaltic concrete mixture exposed under weather conditions in Bogota D.C. (Colombia) during 47-48 months. Mixtures were elaborated by using two asphaltic cements (CA) made in Colombia: CA 80-100 and CA 60-70. Mixtures generally tend to increase their stiffness values after an exposure period, mainly due to hardening and ageing processes undergone by asphaltic binder. A stiffness gain leads to increase endurance against rutting phenomenon and fatigue life of the analyzed mixture employed to lay thick asphaltic layers on the pavement. Based on the resilient modulus evolution due to exposure under environmental conditions, an equation is proposed to approximately predict the evolution of fatigue life endured by a mixture.

Keywords: Resilient modulus, fatigue law, aging, hot asphalt mixture, asphalt cement

1. Introducción

Los principales mecanismos de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y mecanicistas de diseño de pavimentos son la fatiga y el exceso de deformación permanente en la dirección vertical (ahuellamiento) (p.e., Shell, 1978; TAI, 1982; AUSTROADS, 1992; AASHTO, 1993, TRL, 1993; HMSO, 1994; Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de Los Andes, 2002; MEPDG, 2004). El fenómeno de fatiga por cargas cíclicas vehiculares ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica. El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en el extremo inferior de la misma.

1. Introduction

The main degradation mechanisms intended to be controlled by empirical and mechanistic methodologies of pavement design are fatigue and the excess of permanent deformation on vertical road direction (rutting) (e.g., Shell, 1978; TAI, 1982; AUSTROADS, 1992; AASHTO, 1993, TRL, 1993; HMSO, 1994; Urban Development Institute and Universidad de Los Andes, 2002; MEPDG, 2004). Fatigue phenomenon caused by cyclic vehicular loads take place inside bonded layers. In the case of flexible structures, this phenomenon takes place because of high deformation values due to tensile stress in the lowest area of an asphaltic layer. The continuous vehicle traffic makes the asphaltic layer bending down thus generating tensile stresses in its lower area.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: harondonq@udistrital.edu.co



Esta repetición de carga hace que la mezcla asfáltica pierda rigidez y origina la aparición de deformaciones plásticas a tracción que a su vez conducen a la formación de microfisuras. Ante la continuidad de las repeticiones de carga y la disminución de la rigidez se produce la coalescencia de las microfisuras que lleva a la formación de una fisura visible (macrofisura). Si el fenómeno de fatiga es debido a cargas, las macrofisuras se originan en el extremo inferior de la capa asfáltica (zona donde el esfuerzo de tensión es mayor) y se propagan de manera ascendente hacia la superficie del pavimento en donde se reflejan como fisuras paralelas direccionadas en el sentido longitudinal de la vía, las cuales ante la repetición de las cargas de tránsito se propagan formando piezas angulares que desarrollan un aspecto parecido a la piel de cocodrilo. Si este fenómeno ocurre por temperatura el efecto de propagación de fisuras ocurre de manera contraria, las microfisuras se generan desde la rasante y se extiende hacia la fibra inferior de la capa asfáltica. Por otro lado, el ahullamiento es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. En una capa asfáltica, este fenómeno se controla principalmente a través de la rigidez (módulo dinámico o resiliente) de la mezcla que la conforma.

En Colombia son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas debido principalmente a la falta de equipos apropiados para llevar a cabo mediciones en campo y en laboratorio, y al escaso presupuesto destinado para actividades de investigación. Esta situación explica la falta de conocimiento sobre el tema y la inexistencia de un modelo propio que caracterice el comportamiento a la fatiga a partir de las propiedades (mecánicas, químicas, reológicas y físicas) de los materiales, las condiciones del medio ambiente y el comportamiento del tráfico.

En general, los ensayos de fatiga de mezclas asfálticas consisten en someter una muestra, de geometría específica, a solicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de ciclos de carga que puede soportar (Di Benedetto y De la Roche, 2005). Este número de ciclos de carga soportados antes de la falla, se denomina vida a la fatiga. De acuerdo con Epps y Monismith (1972), Rao Tangella et al. (1990) y Di Benedetto et al. (2004) Di Benedetto y De la Roche (2005), la respuesta a la fatiga de mezclas asfálticas se ve afectada principalmente por:

Such repeated load stress causes a stiffness loss of the asphaltic mixture and provokes plastic deformations due to tensile stress, which in turn lead to micro-crackings. Because of continuous and repeated load stress and stiffness loss, micro-cracking coalescence takes place leading to the occurrence of a visible cracking (macro-cracking). If the fatigue phenomenon occurs due to load stress, macro-crackings take place in the lower area of the asphaltic layer (which is the area where the tensile stress is higher). Macro-crackings are spread upwards to the road pavement surface where they are reflected as parallel crackings to the lengthwise carriage way direction, which under repeated traffic loads are spread creating angular pieces that develop a map-cracking appearance. If this phenomenon takes place due to temperature conditions, the crackings spreading effect occurs in the opposite way, thus micro-crackings are provoked from the grade line and they are spread towards the inner fiber in the asphaltic layer. On the other hand, rutting is the residual vertical deformation accumulated due to traffic load, which may cause structural or functional failures to the road pavement. In an asphaltic layer, this phenomenon is mainly controlled by means of its own mixture stiffness (dynamic or resilient modulus).

In Colombia there are few researches developed on asphaltic mixtures fatigue phenomena mainly because of the lack of appropriate equipment to conduct field and laboratory measurements and also due to a small budget for research purposes. Such situation explains the lack of knowledge on this subject and the lack of an appropriate model characterizing fatigue behavior from material properties (mechanical, chemical, rheological and physical point of view), environmental conditions and traffic behavior.

Generally, fatigue tests on asphaltic mixtures consist in placing a specific geometric sample under repeated and identical load stresses; in order to determine the number of load cycles the sample is able to endure (Di Benedetto and De la Roche, 2005). This number of load cycles endured before failure is known as fatigue-life. According to Epps and Monismith (1972), Rao Tangella et al. (1990) and Di Benedetto et al. (2004) Di Benedetto and De la Roche (2005), the fatigue response from asphaltic mixtures is mainly affected by:

- Métodos de compactación de la muestra.
- Modo de carga y el tipo de ensayo aplicado.
- Parámetros de diseño de la mezcla.
- Variables asociadas al medio ambiente.

Un estado del conocimiento más detallado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas puede ser consultado en González y Vásquez (2009).

Por otro lado, los principales factores que afectan la durabilidad de mezclas asfálticas, asumiendo que se encuentran bien construidas son: la edad de envejecimiento y el daño por humedad (Airey, 2003). Es decir, una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no solo para que resista las cargas impuestas por el tránsito sino también la acción del medio ambiente. Cuantificar la influencia que tiene el ambiente sobre el comportamiento de este tipo de material no es una tarea fácil. La forma como se realiza actualmente es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, temperatura y rayos ultra-violeta entre otros) y evaluar la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico) de manera separada sobre el ligante y las mezclas (Kemp y Predoehl, 1981; Welborn, 1984; Kim et al., 1987; Shiao et al., 1991; Bishara et al., 2000; Bocci y Cerni, 2000; Brown y Scholz, 2000; Khalid y Walsh, 2000; Khalid, 2002; Airey, 2003; Said, 2005; Shen et al., 2006). Adicionalmente por lo general estos estudios utilizan ensayos y equipos (p.e., hornos para ensayo de película delgada del tipo TFOT o rotatorios RTFOT, microondas, vasijas de envejecimiento de ligantes a presión PAV) que no pueden reproducir totalmente la influencia que tiene cada uno de los componentes del ambiente sobre las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y los ligantes asfálticos (Jemison et al., 1991; Choquet y Verhasselt, 1992; Kuppens et al., 1997; Verhasselt, 1997). Incluso la mayor parte de las investigaciones combinan estos ensayos y equipos para intentar evaluar la forma como cambian las propiedades de estos materiales cuando experimentan condiciones reales del ambiente (Jemison et al., 1991; Migliori y Corté, 1998; Montepara, 1999; Montepara y Giuliani, 2000; Airey, 2003). En conclusión general se reporta que estas metodologías de ensayo tienen como limitación principal que son incapaces aún de reproducir las condiciones reales a las cuales están expuestas las mezclas asfálticas in situ. Una forma de medir in situ la influencia que tiene el ambiente en el comportamiento de mezclas asfálticas es realizando tramos de prueba o pistas de prueba a escala.

- Sample compactation methods.
- Loading mode and the type of test applied.
- Mixture design parameters.
- Variants associated with the environment.

A detailed reference about fatigue phenomenon on asphaltic mixtures may be consulted from González and Vásquez (2009).

On the other hand, the main factors affecting asphaltic mixtures durability, assuming they are properly constructed, are: ageing rate, and moisture damage (Airey, 2003). Therefore, an asphaltic mixture must be designed and constructed not only to endure traffic loads but also environmental conditions. Evaluating the influence of environmental conditions on this type of material behavior is not an easy task. Nowadays it is carried out by isolating every single component (water, temperature, ultra-violet rays, among others) to separately evaluate their influence on binder and mixtures (from a mechanical and chemical point of view) (Kemp and Predoehl, 1981; Welborn, 1984; Kim et al., 1987; Shiao et al., 1991; Bishara et al., 2000; Bocci and Cerni, 2000; Brown and Scholz, 2000; Khalid and Walsh, 2000; Khalid, 2002; Airey, 2003; Said, 2005; Shen et al., 2006). Additionally and generally, these researches employ test methods and equipment (e.g. thin-film-oven test TFOT, rolling-thin-film-oven test RTFOT, microwave ovens, automatic pressure aging vessels PAV), which can not fully reproduce the influence of each environmental component on mechanical and rheological properties of mixtures and asphaltic binders (Jemison et al., 1991; Choquet and Verhasselt, 1992; Kuppens et al., 1997; Verhasselt, 1997). Furthermore, a significant amount of researches tend to combine these tests and equipment to evaluate material properties changes under real environmental conditions (Jemison et al., 1991; Migliori and Corté, 1998; Montepara, 1999; Montepara and Giuliani, 2000; Airey, 2003). As a general conclusion these test methodologies are unable to reproduce real conditions endured by asphaltic mixtures in situ. A method to measure the environmental influence on the behavior of asphaltic mixtures is by developing segments test or tracks test at scale units.



La limitación de este tipo de pruebas radica en que son costosas y en ellas no se puede medir de manera directa y por separado, la influencia que tienen las cargas vehiculares y el ambiente.

Por todo lo anteriormente expuesto, en este artículo se presenta un estudio que tiene como objetivo principal evaluar la influencia que tienen las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) sobre la rigidez y la resistencia a fatiga de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2007). Se optó por analizar este tipo de mezcla debido a que son las más utilizadas en Colombia para conformar capas de rodadura las cuales son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente. De la misma forma, las condiciones climáticas de Bogotá D.C. fueron escogidas debido principalmente a que la ciudad se encuentra en una zona donde se presentan las siguientes condiciones ambientales en un día determinado: clima predominantemente frío con temperaturas mínimas y máximas promedio de 5°C y 19°C respectivamente y presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día. Con el fin de entender con mayor precisión la influencia del ambiente en el comportamiento de mezclas asfálticas, en futuras investigaciones se analizarán otros climas diferentes. En este artículo se presentan los resultados de los primeros 47-48 meses del proyecto y se evaluaron mezclas fabricadas con los dos CA fabricados en Colombia: CA 60-70 y CA 80-100. Con respecto al clima, estos ligantes son utilizados cuando la temperatura media anual promedio de la zona donde se construirá la capa asfáltica es superior e inferior a 24°C respectivamente (INVIAS, 2007).

Para evaluar la influencia del medio ambiente sobre los parámetros mecánicos de la mezcla se realizaron ensayos de caracterización dinámica como son el de módulo resiliente, resistencia a la deformación permanente y ley de fatiga. Los ensayos de fatiga fueron realizados bajo esfuerzo controlado. La Tabla 1 resume las principales diferencias observadas entre los ensayos bajo esfuerzo controlado y deformación controlada.

The limitation of these tests is their high cost and they can not directly or separately measure the influence of traffic loads and environmental conditions.

Consequently, this paper introduces a study that intends to evaluate the influence of environmental conditions in Bogotá D.C (Colombia) on stiffness and fatigue strength of a dense hot asphaltic mixture type MDC-2 (as per specifications by INVIAS, 2007 – Roads National Institute). It was decided to analyze this type of mixture as it is commonly used to build tread layers, which are directly exposed to environmental conditions. In the same way, climatic conditions of Bogotá D.C. were chosen because the city is located in an area where the following environmental conditions are present during a given day: predominantly cold with minimum and maximum average temperatures of 5°C and 19°C, respectively and; periodical rains at any moment in the same day. In order to accurately understand the environmental influence on the behavior of asphaltic mixtures, further researches will analyze different climate conditions. This paper introduces the results from the first 47-48 months of the project, which evaluates mixtures elaborated with the two CAs produced in Colombia: CA 60-70 and CA 80-100. Regarding climatic conditions, these binders are employed provided that yearly average temperature is higher and lower than 24°C, respectively in the area where the asphaltic layer will be built (INVIAS, 2007).

In order to evaluate the environmental influence on the mixture mechanical parameters, dynamic characterization tests were developed, such as resilient modulus, permanent deformation strength and fatigue law. Fatigue tests were conducted under controlled stress. Table 1 summarizes the main differences observed between tests under controlled stress and controlled deformation.

Tabla 1. Comparación de los ensayos bajo esfuerzo controlado y deformación controlada (Epps y Monismith, 1972; Di Benedetto y De la Roche, 2005)
 Table 1. Comparison between tests under controlled stress and controlled deformation (Epps and Monismith, 1972; Di Benedetto and De la Roche, 2005)

Parámetro/Parameter	Esfuerzo controlado/Controlled stress	Deformación controlada/Controlled deformation
Evolución durante el ensayo Evolution during the test	Aumento de la deformación Deformation increase	Disminución del Esfuerzo Stress decrease
Criterio usual de falla Usual failure criterion	Rotura de la muestra Sample rupture	Perdida de la mitad del esfuerzo inicial Loss of half initial stress
Vida a la fatiga Fatigue-life	Más corta Shorter	Más larga Longer
Dispersión de los resultados Dispersion of results	Más baja Lower	Más alta Higher
Aumento de la temperatura Temperature increase	Disminución de la vida Life decrease	Aumento de la vida Life increase
Aumento del modulo de rigidez Stiffness modulus increase	Aumento de la vida Life increase	Disminución de la vida Life decrease
Efecto del tiempo de receso Effect of recess time	Mayor efecto benéfico Greater benign effect	Menor efecto benéfico Lower benign effect
Duración de la propagación de las macro-fisuras Macro-cracking spreading duration	Corta Short	Larga Long
Crecimiento del daño Damage growth	Más rápido de lo que ocurre in situ Faster than in situ	Más representativo de lo que ocurre in situ More representative than in situ

Actualmente, el grupo de investigación a través de un estudio a nivel de doctorado se encuentra evaluando el efecto de cada uno de los componentes del medio ambiente bogotano y las cargas sobre la mezcla que se evaluó en este estudio. Para el grupo era importante conocer el comportamiento a nivel macro (todos los componentes del ambiente) para luego poder describir y entender con mayor claridad lo que se va a encontrar en los estudios a nivel micro (componentes por separado).

2. Metodología

Diseño de mezclas asfálticas y caracterización de materiales. El agregado pétreo empleado para la elaboración de las mezclas asfálticas para el ensayo Marshall (llamadas briquetas) es procedente de la cantera "Subachoque" (Cundinamarca, Colombia). A estos materiales se le realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (2007a): Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E - 213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E - 222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E - 223), resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de 3/4") por medio de la máquina de Los Ángeles (INV. E - 218), desgaste Micro-Deval (INV. E-238), pérdida en ensayo de solidez (INV. E-220), partículas fracturadas (INV. E - 227),

Presently the investigation team, under a doctorate level study, is evaluating the effect of each component of Bogota environmental conditions and the loads on the mixture chosen for this research. For this team it was important to get acquainted with the behavior of every environmental component, in order to clearly describe and understand the results provided by micro level studies (isolated components).

2. Methodology

Design of asphaltic mixtures and characterization of materials. The quarry rock aggregate used for the elaboration of asphaltic mixtures to be employed in Marshall Test (called briquettes) comes from "Subachoque" quarry (Cundinamarca, Colombia). The following tests were conducted on such materials, in accordance with specifications by the Roads National Institute (2007a): grading analysis on coarse and fine aggregates (INV. E-213), fine aggregates absorption and specific weight (INV. E-222), coarse aggregates absorption and specific weight (INV. E-223), aggregates abrasion resistance (sizes lower than 3/4") by employing the Los Angeles apparatus (INV. E-218); Micro-Deval abrasion test (INV.E-238), strength loss test (INV.E-220), fractured particles (INV. E – 227),

ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E - 133) e índices de alargamiento y aplanamiento (INV. E-230). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 2 y se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones INVIAS (2007) para fabricar mezclas tipo MDC-2 para capas de rodadura.

test to measure sand content (INV. E – 133) and elongation - flattening indexes (INV. E-230). These test results are presented in table 2, which values meet the minimum quality standards established by INVIAS (2007) specifications for the elaboration of MDC-2 mixtures used for tread layers construction.

Tabla 2. Caracterización de los agregados
Table 2. Aggregates Characterization

Ensayo/Test	Resultado/Result
Peso específico Specific weight	2.56
Equivalente de arena Sand Content	86%
Caras fracturadas Fractured faces	92%
Índice de alargamiento Elongation index	10%
Índice de aplanamiento Flattening index	10%
Ataque en Sulfato de sodio Sodium sulfate attack	12.4%
Microdeval Microdeval	20.3%
Resistencia al desgaste máquina de los Ángeles Abrasion resistance Los Ángeles apparatus	22.5%

A los cementos asfálticos CA 80-100 y CA 60-70 se le realizaron los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS (2007) para caracterizarlo como son: penetración (ASTM D-5), viscosidad absoluta (ASTM D-4402), ductilidad (ASTM D-113), solubilidad en tricloroetileno (ASTM D-2042), contenido de agua (ASTM D-95), punto de ablandamiento (INV. E-712) y ensayos al residuo luego del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT por sus siglas en inglés, ASTM D-2872). Los resultados de estos ensayos se presentan en las Tablas 3 y 4.

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y a los cementos asfálticos se fabricaron cinco briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) por cada porcentaje de asfalto entre 4.5 y 6.5 %, con el fin de realizar el diseño Marshall (INV. E-748, INVIAS, 2007a) para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. Para cumplir con las especificaciones del INVIAS (2007) y fabricar mezclas asfálticas tipo MDC-2, se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedios en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall.

In order to characterize mixtures the following standard tests were conducted on asphaltic cements CA 80-100 and CA 60-70 according to (INVIAS 2007) specifications: penetration (ASTM D-5), dynamic viscosity (ASTM D-4402), ductility (ASTM D-113), solubility in trichloroethylene (ASTM D-2042), water content (ASTM D-95), softening point (INV. E-712), residual analysis after rolling-thin-film-oven test (RTFOT) ASTM D-2872). These tests results are presented in Tables 3 and 4.

After analyzing tests conducted on quarry rock aggregates and on asphaltic cements, five briquettes were elaborated (compactated with 75 strikes per face) for each asphalt percentage between 4.5% and 6.5%, in order to develop Marshall Design (INV. E-748, INVIAS, 2007a), so as to determine the optimum asphalt content of the mixture. In order to meet INVIAS (2007) specifications and to elaborate asphalt mixtures type MDC-2, the original aggregates grading was modified by using as a reference the percentage average values from grading range, established by the specification for briquettes elaboration for Marshall Test.

Los cálculos obtenidos del ensayo Marshall están registrados en las tablas 5-6. Los porcentaje óptimos de cemento asfáltico de acuerdo con los datos de las tablas 5-6 son de 5.3% y 5.6% para el caso de mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. En estos porcentajes se están cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por la especificación INVIAS (2007) para MDC-2 y tránsito tipo NT1 y/o NT2 (bajos y medios volúmenes de tránsito).

Calculations obtained from Marshall Test are registered in Tables 5 and 6. The optimum percentages of asphaltic cements, according to data in tables 5 and 6, are 5.3% and 5.6% for mixtures elaborated with CA 80-100 and CA 60-70, respectively. These percentages meet the minimum requirements established by INVIAS (2007) specification for MDC-2 and traffic types NT1 and/or NT2 (low and medium traffic volumes).

Tabla 3. Características generales del cemento asfáltico
Table 3. General Characteristics of CA 80-100 asphaltic cement

Ensayo/Test	Método/Method	Unidad/Unit	CA 80-100	Resultado/Result
Ensayos sobre el asfalto original Tests developed on original asphalt				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	80-100	85
Índice de penetración Penetration index	INV. E-724	-	-1/+1	-0.5
Viscosidad absoluta (60°C) Dynamic viscosity (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad (25°C, 5cm/min) Ductility (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en Tricloroetileno Trichloroethylene solubility	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua Water content	ASTM D-95	%	0.2 máx.	<0.2
Punto de inflamación COC Flashpoint COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	295
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT Test developed on residue after RTFOT				
Pérdida de masa Mass loss	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.2
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

Tabla 4. Características generales del cemento asfáltico
Table 4. General Characteristics of CA 60-70 asphaltic cement

Ensayo/Test	Método/Method	Unidad/Unit	CA 60-70	Resultado/Result
Ensayos sobre el asfalto original Tests developed on original asphalt				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	60-70	67
Índice de penetración Penetration index	INV. E-724	-	-1/+1	-0.7
Viscosidad absoluta (60°C) Dynamic viscosity (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1500 mín.	1750
Ductilidad (25°C, 5cm/min) Ductility (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	>105
Solubilidad en Tricloroetileno Trichloroethylene solubility	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua Water content	ASTM D-95	%	0.2 máx.	<0.2
Punto de inflamación COC Flashpoint COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	275
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT Test developed on residue after RTFOT				
Pérdida de masa Mass loss	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.4
Penetración (25°C, 100 g, 5 s) Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	52 mín.	70

Tabla 5. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 80-100
 Table 5. Summary of Marshall Test for MDC-2 asphaltic mixture containing CA 80-100

CA [%]	Peso unitario Unit weight [g/cm ³]	Estabilidad Stability (E) [kg]	Vacíos en la mezcla Mixture Voids [%]	Vacíos en agregados Aggregates Voids [%]	Flujo (F) Flow [mm]	Relación Relation E/F [kg/mm]
4.5	2.21	710	7.63	17.52	3.33	213.09
5.0	2.24	835	5.76	16.89	3.45	242.14
5.5	2.24	853	5.09	17.33	3.51	243.48
6.0	2.23	813	4.64	17.96	3.70	219.71

Tabla 6. Resumen ensayo Marshall para mezcla asfáltica MDC-2 con CA 60-70
 Table 6. Summary of Marshall Test for MDC-2 asphaltic mixture containing CA 60-70

CA [%]	Peso unitario Unit weight [g/cm ³]	Estabilidad Stability (E) [kg]	Vacíos en la mezcla Mixture Voids [%]	Vacíos en agregados Aggregates Voids [%]	Flujo (F) Flow [mm]	Relación Relation E/F [kg/mm]
5.0	2.24	1189	5.83	16.95	3.40	349.86
5.5	2.25	1323	4.47	16.80	3.60	367.84
6.0	2.25	1393	3.48	16.96	3.69	377.18
6.5	2.26	1229	3.02	17.60	3.92	313.38

Fase experimental. Luego de realizar el diseño Marshall se elaboraron las briquetas (180 por tipo de CA) de mezcla asfáltica tipo MDC-2 necesarias para exponerlas al ambiente de la ciudad de Bogotá D.C., utilizando el contenido óptimo de CA. Estas muestras fueron colocadas en el techo de un edificio de la ciudad de Bogotá D.C.

Durante los primeros 47-48 meses del proyecto, cada tres meses a estas briquetas se les han realizado ensayos de módulo resiliente y resistencia a la deformación permanente para evaluar la evolución de estos parámetros con el tiempo de exposición al medio ambiente. El ensayo de módulo resiliente (INV. E-749, INVIAS, 2007a) ha sido realizado bajo tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), y el de resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida fue realizado bajo un esfuerzo de 100 kPa y a 3600 ciclos de carga siguiendo el procedimiento normalizado por EN 12697-22 (CEN, 2005). Con los resultados de estos ensayos se desarrolló una ecuación empírica para predecir la evolución de la rigidez de la mezcla analizada con el tiempo de exposición al medio ambiente.

Development phase. After applying Marshall Design, briquettes were elaborated (180 each per type of CA) with asphaltic mixture MDC-2 to be exposed under Bogota D.C environmental conditions, employing the optimum CA content. These samples were placed on a building roof in Bogota D.C.

During the first 47-48 months of the Project, every three months resilient tests and permanent deformation tests were developed on these briquettes, in order to evaluate the parameters evolution in relation to environmental exposure periods. Resilient modulus test (INV. E-749, INVIAS, 2007a) has been developed at three different temperatures (10, 20 and 30°C), and load frequencies (2.5, 5.0 and 10.0 Hz) by using the Nottingham Asphalt Tester (NAT). The permanent deformation resistance test, under repeated load cycles, was conducted under 100 kPa stress at 3600 load cycles in accordance with standard procedure by EN 12697-22 (CEN, 2005). By using these tests results, an empirical equation was developed in order to predict the strength evolution of the analyzed mixture, in relation to the exposure time period to environmental conditions.

Para evaluar la influencia del medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. sobre la resistencia a fatiga de la mezcla estudiada, se ejecutaron dos fases:

1. Fase 1: se analizaron 360 ensayos de fatiga y módulo resiliente realizados sobre muestras de mezclas de concreto asfáltico tipo MDC-1, MDC-2 y MDC-3 (acordes con INVIAS, 2007) fabricadas con CA 80-100. El análisis se realizó con el fin de determinar la evolución de la resistencia a fatiga de las mezclas con la rigidez. Los resultados de las fatigas analizadas fueron obtenidos realizando ensayos por el método de tensión indirecta en un equipo NAT y siguiendo el procedimiento establecido por la especificación prEN 12697-24E (CEN, 2005). La temperatura del ensayo y la frecuencia de carga fueron de 20°C y 2.5 Hz respectivamente. El tipo de carga ejecutado en el ensayo fue el de esfuerzo controlado. Las dimensiones de las muestras para los ensayos de fatigas son las mismas de las briquetas Marshall.

Con los resultados de esta fase se desarrolló una ecuación empírica que relaciona el cambio que experimenta la vida a fatiga de mezclas de concreto asfáltico con la rigidez.

2. Fase 2: utilizando la ecuación desarrollada con los resultados de la fase 1, y con base en los datos de evolución de la rigidez de la mezcla MDC-2 con el tiempo de exposición al medio ambiente, se determinó de manera aproximada el incremento en la resistencia a fatiga que experimenta dicha mezcla cuando es expuesta al clima de la ciudad de Bogotá D.C.

3. Resultados

En las Figuras 1a-b se presenta la evolución del módulo resiliente inicial (E_{or} , en MPa) de la mezcla MDC-2 (fabricada con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente) con la temperatura (T , en °C) y la frecuencia de carga (F , en Hz). Se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. Esta evolución puede ser representada matemáticamente a través de la ecuación empírica (1). Para emplear esta ecuación, es necesaria la identificación de seis variables de estado obtenidas a través de regresiones. Para el caso de la mezcla analizada los valores de estas variables se presentan en la Tabla 7.

So as to evaluate environmental conditions influence of Bogota D.C. on fatigue strength in the studied mixture, two phases were developed.

1. Phase 1: 360 fatigue tests and resilient modulus were analyzed on asphaltic concrete mixtures type MDC-1, MDC-2 and MDC-3 (developed in accordance with INVIAS, 2007), which were elaborated with CA 80-100 mixture. This analysis was developed in order to determine the evolution of mixtures fatigue strength under stiffness. Fatigue results were obtained by conducting tests with the indirect tensile method using a NAT apparatus, following the procedures established by the prEN 12697-24E (CEN, 2005) specification. The test temperature and load frequency were 20°C and 2.5 Hz, respectively. Load type selected for this test was controlled stress. Samples dimensions for fatigue tests are the same as those in Marshall Briquettes.

The results from this phase were used to develop an empirical equation that relates the evolution undergone by fatigue-life of asphaltic concrete mixtures under stiffness.

2. Phase 2: By employing the equation developed from phase 1 results, and based on data from stiffness evolution of time-exposed MDC-2 mixture under environmental conditions, the fatigue strength increase endured by such mixture when exposed at climate conditions in Bogota D.C. was determined quite accurately.

3. Results

Figures 1a-b present the evolution of initial resilient modulus (E_{or} , in MPa) of MDC-2 mixture (elaborated with CA 80-100 and CA 60-70, respectively) at temperature (T , in °C) and frequency load (F , in Hz). A typical modulus increase is observed when load frequency is increased and temperature decreases in the test. This evolution may be mathematically represented by means of the empirical Equation (1). In order to employ this equation, it is necessary to identify six status variants obtained by means of regressions. In the case of the analyzed mixture, these variants are presented in Table 7.

Estas variables no presentan un significado físico definido y cambian principalmente con el tipo de ligante, la granulometría y el tipo de agregado pétreo utilizado para la fabricación de las mezclas. La frecuencia de carga F en la Ecuación (1) puede ser traducida a velocidad del vehículo (V , en cm/s) a través de la ecuación (2) propuesta por Lin (1989, 1989a).

These variants do not deliver a defined physical meaning and they mainly change with the type of binder, grading and type of rock aggregate employed in the elaboration of mixtures. Load frequency F in the Equation (1) may be translated as the vehicle speed (V , in cm/s) by means of equation (2) proposed by Lin (1989, 1989a).

$$E_o = \exp(a + bT^2) + [\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3) F]^2 \sqrt{\quad} \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{2\pi t_c} \quad t_c = \frac{L}{V} 10^{0.004h} \quad (2)$$

t_c es el tiempo de aplicación de carga en segundos de un vehículo en movimiento a diferentes profundidades (h en cm. y medida desde la superficie de la estructura del pavimento) y L es la longitud de contacto de la llanta con el pavimento (generalmente de 30 cm.).

t_c is loading time expressed in seconds for an in-motion vehicle at different depths (h in cms and measured from the pavement structure surface) and L is the wheel rim length in contact with the road pavement (usually 30 cms).

Tabla 7. Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función de T y F
Table 7. Variants used to simulate MDC-2 mixture stiffness in function of T and F

CA	a	b	c	d	e	f
80-100	8.78	-0.0035	5.26	-0.63	12.4	-1.75e-4
60-70	9.21	-0.00214	3.4	-0.31	14.9	-1.5e-4

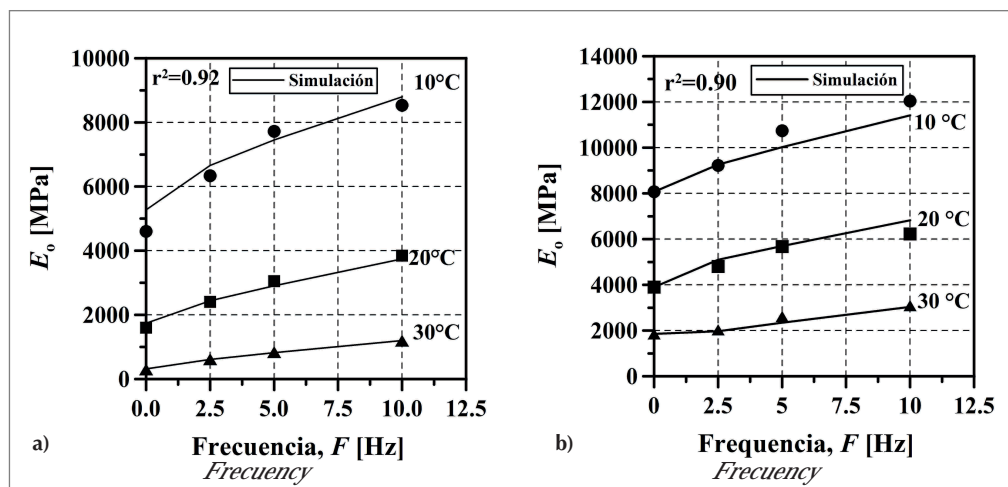


Figura 1. Evolución del módulo resiliente inicial (E_o) de la mezcla MDC-2 con la temperatura (T) y la frecuencia de carga (F). Mezcla fabricada con a) CA 80-100 y b) CA 60-70

Figure 1. Evolution of initial resilient modulus (E_o) of MDC-2 mixture at temperature (T) and load frequency (F). Mixture elaborated from a) CA 80-100 y b) CA 60-70

En la Figura 2 se observa la evolución del módulo resiliente de las mezclas asfálticas con el tiempo. Se observa para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 (Figuras 2a y b respectivamente) un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, el módulo tiende a aumentar con el tiempo de exposición al ambiente (ver Figura 2a) y por lo tanto la resistencia a la deformación permanente aumenta (Figura 3). Este fenómeno es debido principalmente al envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico por efectos de temperatura y exposición a radiación ultra-violeta (UV).

Figure 2 indicates the evolution of resilient modulus for asphaltic mixtures throughout time. Mixtures fabricated from CA 80-100 and CA 60-70 (Figures 2a and b, respectively) show a typical modulus increase when load frequency is incremented and test temperature is decreased. In mixtures fabricated from CA 80-100, the modulus tends to increase throughout exposure time under environmental conditions (see Figure 2a) and, therefore, permanent deformation strength increases (Figure 3). Such phenomenon takes place mainly due to oxidative ageing experimented by asphaltic cements due to temperature and ultra-violet (UV) radiation exposure effects.

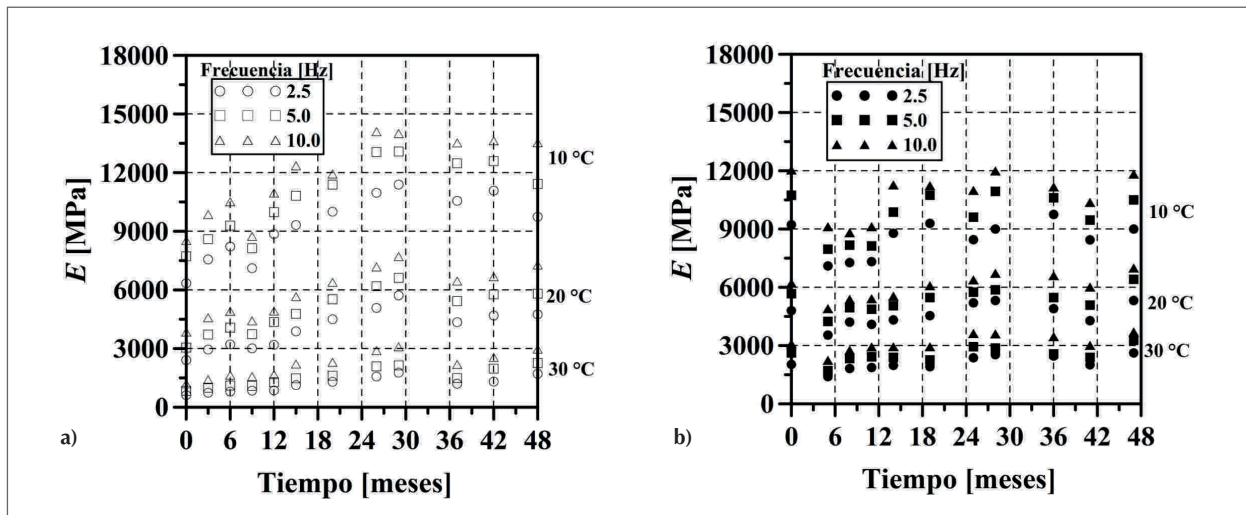


Figura 2. Evolución del módulo resiliente (E) con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas fabricadas con a) CA 80-100 y b) CA 60-70
 Figure 2. Evolution of resilient modulus (E) throughout ageing time (t) for mixtures elaborated from a) CA 80-100 and b) CA 60-70

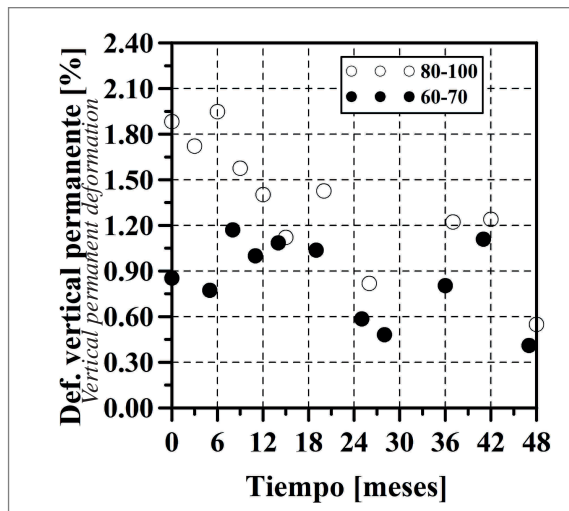


Figura 3. Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento (t) para mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70
 Figure 3. Evolution of vertical permanent deformation throughout ageing time (t) for mixtures elaborated from CA 80-100 and CA 60-70

Las mezclas fabricadas con CA 60-70 experimentan un comportamiento diferente en comparación con aquellas fabricadas con CA 80-100 (ver Figuras 2b y 3). En los primeros meses de exposición, las mezclas disminuyen su módulo aumentando las deformaciones permanentes, luego dicho módulo se estabiliza y por último la tendencia es a aumentar (especialmente cuando el ensayo se realiza con temperaturas entre 20 y 30°C) tendiendo a disminuir los valores de deformación. El decaimiento en el módulo es debido tal vez a la generación de micro-fisuras que se producen a bajas temperaturas cuando las mezclas son rígidas (comportamiento frágil), luego estas micro-fisuras se estabilizan y el aumento en rigidez se debe a un fenómeno de envejecimiento y oxidación del asfalto similar al que ocurre en las mezclas con CA 80-100. El fenómeno de micro-fisuración a bajas temperaturas ha sido ampliamente reportado por diversos investigadores (p.e., Kliewer et al., 1996; Sebaaly et al., 2002; Nesnas y Nunn, 2006).

El efecto del agua no es claro en los resultados observados ya que la humedad en las mezclas produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, generando una posible disminución del módulo y de la resistencia mecánica. Investigaciones adicionales en esta área deben ser realizadas.

En la Figura 4 se presenta la relación (E/E_0) entre el módulo resiliente que se obtiene luego de someter las briquetas al ambiente durante distintos periodos de tiempo (E) y el módulo resiliente inicial de las mezclas en un tiempo $t=0$ meses (E_0). Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 80-100, el módulo alcanzado en $t=48$ meses aumenta entre un 48 y 176% (dependiendo de la temperatura y frecuencia del ensayo) con respecto al inicial. El mayor incremento se observa a medida que aumenta la temperatura en el ensayo. Las mezclas con CA 60-70 experimentan una disminución máxima en su módulo de 35% en los primeros cinco meses de exposición para luego aumentar y experimentar en $t=47$ meses, módulos que superan ligeramente el valor inicial. Estos resultados pueden ser expresados matemáticamente a través de las ecuaciones (3a) y (3b) para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. Esta ecuación puede ser utilizada solamente para la mezcla analizada en el rango de tiempo evaluado (47-48 meses) ya que se debe prever un cambio del comportamiento de la misma a medida que aumente t . Al igual que en la ecuación (1), en la (3) la variables estado k_1 - k_3 son obtenidas a través de regresión y no presentan un significado físico definido (ver Tabla 8).

Mixtures fabricated from CA 60-70 experiment a different behavior in comparison to those fabricated from CA 80-100 (see Figures 2b and 3). During the first exposure months, the mixtures decrease their modulus by increasing permanent deformations. Afterwards such modulus is stabilized and finally there is an increasing tendency to decrease deformation values (especially when the test is developed at temperatures ranging from 20 to 30°C). Probably the modulus decay is produced by micro-cracking generation, which appears at low temperatures when mixtures are too rigid (fragile behavior). Then those micro-cracking are stabilized and the stiffness increases due to an ageing and asphalt oxidative phenomenon similar to the one taking place in CA 80-100 mixtures. Micro-cracking phenomenon at low temperatures has been widely studied by several researchers (e.g., Kliewer et al., 1996; Sebaaly et al., 2002; Nesnas and Nunn, 2006).

Water effect is not clear from observed results, since mixture humidity produces de-bonding between rock aggregate and asphalt; probably provoking a modulus decrease and mechanical resistance drop. Additional researchers in this field shall be conducted.

Figure 4 presents the relation (E/E_0) between resilient modulus obtained after exposing briquettes under environmental conditions during different periods of time (E) and, the initial mixtures resilient modulus for a period of $t=0$ months (E_0). In the case of mixtures elaborated from CA 80-100, the modulus obtained from $t=48$ increases from 48 to 176%, in relation to the initial modulus (depending on the temperature and frequency of the test). The most significant increment is observed as long as temperature increases in the test. CA 60-70 mixtures experiment a maximum modulus decrease of 35% during the first five months of exposure. However, after $t=47$ months, these mixtures increase and experiment modulus that slightly supersede the initial value. These results can be mathematically expressed by means of equations (3a) and (3b) for CA 80-100 and CA 60-70 asphaltic mixtures. This equation can only be employed for the analyzed mixture in the period of time under analysis (47-48 months), because the mixture behavior might change as long as t increases. As well as in equation (1), in equation (3) the status variants k_1 - k_3 are obtained by means of regressions and do not provide a defined physical meaning (see Table 8).

Ecuaciones empíricas regresionales que pueden reproducir la evolución del módulo resiliente con el tiempo de exposición al medio ambiente son enunciadas en (4a) y (4b) para las mezclas fabricadas con CA 80-100 y CA 60-70 respectivamente. Estas Ecuaciones son formuladas con base en las Ecuaciones (1) y (3). En la Figura 4 se presenta la simulación de los ensayos ejecutados empleando las ecuaciones (4a-b) y el coeficiente de correlación es $r^2=0.79$.

Regression empirical equations that might reproduce the evolution of resilient modulus throughout time of exposure under environmental conditions, are enunciated in (4a) and (4b) for CA 80-100 and CA 60-70 mixtures, respectively. Such Equations are formulated based on the equations (1) and (3). Figure 4 presents the simulation of executed tests employing the equations (4a-b) and the correlation coefficient is $r^2=0.79$.

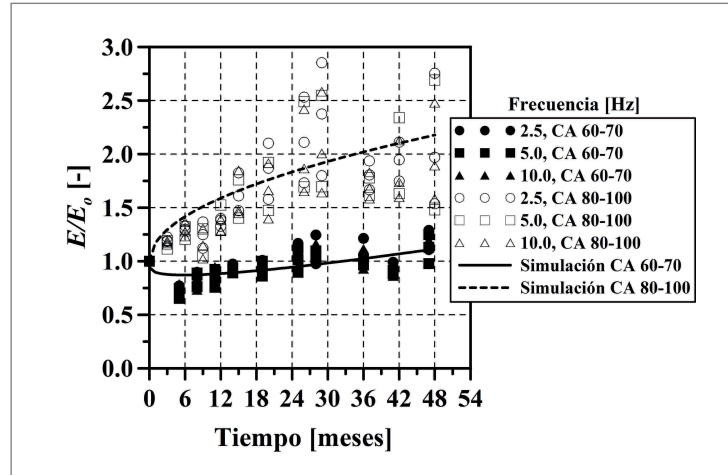


Figura 4. Evolución de la relación entre el módulo resiliente (E) y el módulo inicial (E_0) con el tiempo de envejecimiento (t)
 Figure 4. Evolution of relation between resilient modulus (E) and initial modulus (E_0) throughout ageing time (t)

$$\frac{E}{E_0} = 1 + k_1 \sqrt{t} \quad \text{para/for CA 80-100} \quad (3a)$$

$$\frac{E}{E_0} = 1 - (k_1 + k_2 t + k_3 \sqrt{t}) \quad \text{para/for CA 60-70} \quad (3b)$$

$$E = \left\{ \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3)\sqrt{F} \right]^2 \right\} [1 + k_1 \sqrt{t}] \quad \text{para/for CA 80-100} \quad (4a)$$

$$E = \left\{ \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3)\sqrt{F} \right]^2 \right\} [1 - (k_1 + k_2 t + k_3 \sqrt{t})] \quad \text{para/for CA 60-70} \quad (4b)$$

Tabla 8. Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función del tiempo de exposición al medio ambiente
 Tabla 8. Variants used to simulate mixture MDC-2 stiffness, in function of exposure time under environmental conditions

CA	k1	k2	k3
80-100	0.17	-	-
60-70	0.058	-0.012	0.058

La Figura 5a presenta los resultados de los ensayos de fatiga realizados sobre 360 muestras de concreto asfáltico tipo MDC-1, MDC-2 y MDC-3. Se observa una disminución del valor de ϵ_{max} (amplitud de la deformación para que el material falle cuando se aplican N_f ciclos de carga) a medida que incrementa el módulo resiliente de las mezclas (E), lo que equivale a un estado en el cual el material está cambiando su comportamiento de dúctil a frágil por rigidización. Estos resultados pueden ser representados matemáticamente a través de la Ecuación (5). Se escogió esta ecuación teniendo en cuenta que para un nivel muy pequeño de amplitud de deformación aplicado al material, el mismo puede soportar infinitas veces dicha amplitud sin que haya ruptura (concepto de límite de resistencia a la fatiga según Carpenter et al., 2003 y Reyes, 2003). Los valores de las variables de estado de la Ecuación (5) fueron determinados por regresión: $k_4=6.24 \times 10^{-6}$, $k_5=0.48$ y $k_6=15.79$. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por Schmidt y Santucci (1969). A pesar de que el material admite menores deformaciones en tracción a medida que se rigidiza, la vida a fatiga o el número de ciclos para que el mismo falle (N_f) aumenta tal como se describe en la ecuación (6) (ver Figura 6). Estos resultados son acordes con aquellos reportados en la literatura de referencia.

Figure 5a presents the results from fatigue testing developed on 360 samples of asphaltic concrete type MDC-1, MDC-3 and MDC-3. There is an amplitude value decrease ϵ_{max} (deformation amplitude for material failure when N_f load cycles are applied) as long as resilient modulus is incremented in mixtures (E), which is equivalent to the status where the material is changing its behavior from ductile to fragile due to stiffening. These results can be mathematically represented by means of Equation (5). This equation was chosen taking into consideration that for a very low level of deformation amplitude applied on the material, it can endure such amplitude infinite times without rupturing (concept of fatigue endurance limit stated by Carpenter et al., 2003 and Reyes, 2003). Status variant values in the equation (5) were determined by means of regression: $k_4=6.24 \times 10^{-6}$, $k_5=0.48$ and $k_6=15.79$. Similar results as the ones found in this research were reported by Schmidt and Santucci (1969). Although material allows lower tensile deformations as long as it stiffens, fatigue-life or the number of cycles required for material failure (N_f) increases, as described by equation (6) (see figure 6). Such results are in accordance with those reported by the referred biography.

$$\epsilon_{max} = k_4 + \frac{k_5}{E} + \frac{k_6}{E^{3/2}} \quad (5)$$

$$N_f = 4.74 \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{-2.96} 10^{0.165} \quad (6)$$

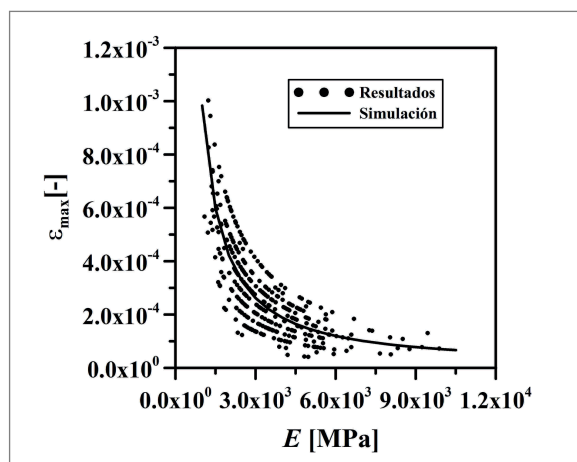


Figura 5. Evolución de ϵ_{max} con E
 Figure 5. Evolution of ϵ_{max} with E

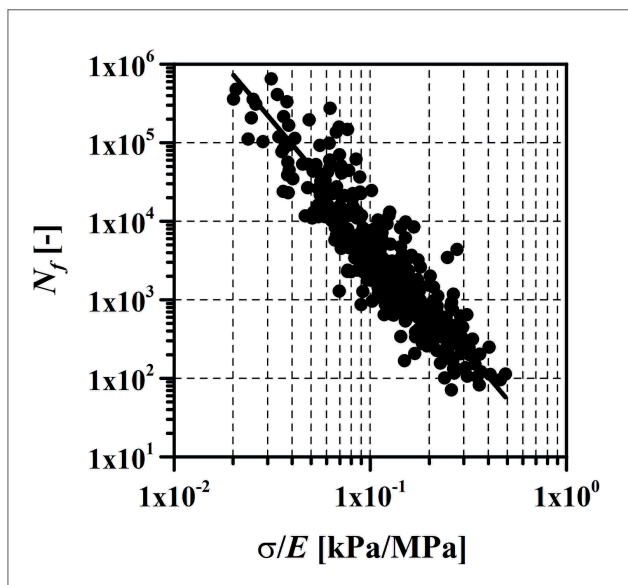


Figura 6. Evolución del número de ciclos de falla con σ/E
 Figure 6. Evolution of number of failure cycles with σ/E

Si las ecuaciones (4-5) se fusionan se obtiene, el cambio que experimenta ε_{\max} con la evolución de la rigidez de las mezclas sometidas al medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. Utilizando estas ecuaciones se puede predecir que la deformación a tracción admisible de la mezcla disminuirá, desde $t_{\text{inicial}}=0$ hasta $t=29$ meses, entre 55 a 64% tan solo por el efecto de aumento de rigidez que experimenta cuando es sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. De la misma forma, a través de la ecuación (6) se reporta, para el mismo periodo de tiempo, un incremento promedio de la vida a fatiga de 6.85 veces por el efecto de rigidización de la mezcla. A partir de $t=30$ hasta $t=48$ meses el efecto de la rigidez disminuye y la mezcla experimentará un aumento en la vida a fatiga de 10 veces por efecto de rigidización desde $t_{\text{inicial}}=0$ hasta $t_{\text{inicial}}=48$ meses.

El análisis para el caso de la vida a fatiga de las mezclas fabricadas con CA 60-70 es mucho más complejo ya que en los primeros meses de exposición al medio ambiente, la rigidez decae en promedio un 12.8% generando una disminución en la vida a fatiga de la mezcla de 33%. Sin embargo, entre $t=5$ y $t_{\text{final}}=47$ meses vuelve e incrementa la rigidez generando al final del periodo de exposición un leve incremento promedio en la vida a fatiga de 38% con respecto a $t_{\text{inicial}}=0$ meses.

If equations (4-5) are fused, the evolution experimented by ε_{\max} with the evolution of mixtures stiffness exposed to environmental conditions in Bogota D.C. are obtained. By using these equations it is possible to predict that acceptable tensile deformation of the mixture will decrease from $t_{\text{inicial}}=0$ up to $t=29$ months, from 55 to 64%, only due to the effect of increased stiffness during exposure to environmental conditions in Bogota D.C. In the same way, during the same period of time the equation (6) reports an average increase of fatigue-life 6.85 times higher, due to the mixture stiffening effect. From $t=30$ up to $t=48$ months, stiffening effect decreases and the mixture will experiment a fatigue-life increase of 10 times, due to stiffening from $t_{\text{inicial}}=0$ up to $t_{\text{inicial}}=48$ months.

The analysis of fatigue-life for CA 60-70 mixtures is far more complex, since during the first exposure months under environmental conditions, stiffness drops in an average of 12.8% causing a reduction of 33% in the mixture fatigue-life. However, between $t=5$ and $t_{\text{final}}=47$ months, it reappears and increases stiffness, thus generating at the end of exposure time a slight average increment of fatigue-life of 38% in comparison to $t_{\text{inicial}}=0$ months.

4. Conclusiones

En este estudio se ejecutó una fase experimental destinada a medir la influencia de las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C. sobre la rigidez y la vida a fatiga de una mezcla de concreto asfáltico tipo MDC-2 fabricada con cemento asfáltico tipo CA 80-100 y CA 60-70. De los resultados se concluye que el módulo resiliente de este tipo de mezcla fabricada con CA 80-100, incrementa en promedio durante 48 meses de exposición al medio ambiente 2.17 veces. Este incremento en rigidez genera un incremento aproximado de 10 veces en la vida a fatiga de la mezcla tan solo por el efecto de rigidización del ligante asfáltico producto del envejecimiento del mismo. Para el caso de las mezclas fabricadas con CA 60-70 el incremento en la vida a fatiga durante los 47 meses de exposición fue tan solo de 38% ya que en los primeros 5 meses de exposición dicha propiedad disminuyó posiblemente por micro-fisuración térmica que experimentó la mezcla a bajas temperaturas. El aumento en rigidez de las mezclas generó un incremento obvio en la resistencia al fenómeno de ahuellamiento.

Los resultados de fatiga presentados con anterioridad son válidos para el caso en el que la mezcla analizada conforme capas asfálticas gruesas, en donde el modo de carga es el de esfuerzo controlado. Así mismo son válidos para condiciones en las cuales el pavimento esté sometido solo a condiciones del medio ambiente y para el periodo de tiempo analizado. Actualmente el grupo de investigación está evaluando de manera conjunta el efecto de las cargas, el cambio en la composición química del ligante y el medio ambiente para poder entender con claridad cómo evolucionan los mecanismos de daño en capas asfálticas.

4. Conclusions

This study conducted a development phase intended to measure the influence of climatic conditions in Bogota D.C, on the stiffness and fatigue-life of an asphaltic concrete mixture type MDC-2 elaborated from asphaltic cement type CA 80-100 and CA 60-70. From obtained results it is concluded that resilient modulus of the CA 80-100 mixture increases an average of 2.17 times, during 48 months of exposure under environmental conditions. Such stiffness increase generates an increment of approximately 10 times in mixture fatigue-life, only because of asphaltic binder stiffening effect, due to its own ageing condition. In the case of CA 60-70 mixtures, the increment of fatigue-life during 47 exposure months was only of 38%, since during the first 5 months such property decreased probably due to thermal micro-cracking endured by the mixture at low temperatures. The mixtures stiffness increment created an obvious endurance increase against rutting phenomenon.

Fatigue results previously introduced are valid provided that the analyzed mixture is made of thick asphaltic layers, where controlled stress is the loading mode. These results are also valid for pavements exposed only under environmental conditions and during the analyzed period of time. Presently the research group is jointly evaluating the loading effects, the modification of binder chemical composition and the environmental conditions to clearly understand the evolution of damage mechanisms on asphaltic layers.

5. Referencias / References

- AASHTO (1993), American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for design of pavement structures. Washington, D.C.
- Airey G. D. (2003), State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4, No 3, 165-176.
- Austrroads (1992), Pavement design, a guide to the structural design of road pavement. Austrroads, Sydney, Australia.
- Bishara S. W., Robertson R. E. and Mahoney D. (2000), Rapid oxidative aging of binder using microwave energy - an improved method. In Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 2: Development in Bituminous Products and Techniques, (Barcelona), 27-36.
- Bocci M. and Cerni G. (2000), The ultraviolet radiation in short-and long-term aging of bitumen. In: Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona), 49-58.
- Brown S. F. and Scholz T. V. (2000), Development of laboratory protocols for the ageing of asphalt mixtures. In: Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), 83-90.

- Carpenter S. H., Ghuzlan K. A. and Shen S. (2003), Fatigue endurance limit for highway and airport pavement. *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1832, TRB, National Research Council, Washington D.C., 131-138.
- CEN (2005), Committee European of Normalization. *Bituminous Mixture Test Methods for Hot Mix Asphalts - Part25: Cyclic Compression Tests*.
- Choquet F. S. and Verhasselt A. F. (1992), Natural and accelerated ageing of bitumens - effects on the asphaltenes. In: *Proc. of an International Symposium on Asphaltene Particles in Fossil Fuel Exploration, Recovery, Refining and Production Processes*, Ed. MK Sharna and TF Yen 1994, Plenum Press, New York, 13-29.
- Di Benedetto H. and De la Roche C. (2005), State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures. Report RILEM No. 17 Bituminous binders and mixes: State of the art and interlaboratory test on mechanical behavior and mix design, L. Francken, ed., E and FN Spon, London, 2005, pp. 97-123.
- Di Benedetto H., De la Roche C., Baaj H., Pronk, A. and Lundstrom R. (2004), Fatigue of bituminous mixtures. *Material and Structures*, Vol. 37, No. 4, 202-216.
- Epps J. A. (1969), Influence of mixture variables on the flexural fatigue and tensile properties of asphalt concrete. Ph. D. thesis, University of California, Berkeley, Calif.
- Epps J. A. and Monismith C. L. (1972), Fatigue of asphalt concrete mixtures - summary of existing information. *Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures*, ASTM STP 508, American Society for Testing and Materials, 19-45.
- González L. A. and Vásquez S. E. (2009), Estado del conocimiento sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C. (Colombia).
- Harvey J. and Tsai B.-W. (1997), Long-term oven aging effects on fatigue and initial stiffness of asphalt concrete. *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, No. 1590, 89-98.
- HMSO (1994), *DMRB-Design Manual for Roads and Bridges*. Vol. 7, HD 25/94, part 2, Foundations.
- Instituto de Desarrollo Urbano y Universidad de Los Andes. (2002). *Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia.
- INVIAS (2007), Instituto Nacional de Vías. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C., Colombia.
- INVIAS (2007a), Instituto Nacional de Vías. *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. V. I y II. Bogotá D.C., Colombia.
- Jemison, H. B., Davison, R. R., Glover, C. J. and Bullin, J. A. (1991). Evaluation of standard oven tests for hot-mix plant aging. *Transportation Research Record*, 1323, Transportation Research Board, Washington D.C., 77-84.
- Kemp G. R. and Predoehl N. H. (1981), A comparison of field and laboratory environments of asphalt durability. *Proc. Assn. Asphalt Paving Technol.*, 50, 492-537.
- Khalid H. A. (2002), A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, *Transport* 153, Issue 3, 171-181.
- Khalid H. A. and Walsh C. M. (2000), Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials. In: *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona)*, 398-405.
- Kim O.-K., Bell C. A., Wilson J. E. and Boyle G. (1987), Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1115, Transportation Research Board, Washington D.C., 101-112.
- Kliwer J. E., Zeng H. and Vinson T. S. (1996), Aging and low-temperature cracking of asphalt concrete mixture. *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 10, No. 3, 134-148.
- Kuppens E. A. M., Sanches F., Nardelli L. and Jongmans E. C. (1997), Bitumen-ageing tests for predicting durability of porous asphalt. In: Di Benedetto, H., Francken, L., *Proc. Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials*, 71-77.
- Lin X. X. A (1989), Method of Determining the Relevant Parameters in the Calculation of Pavement Deformation of Bituminous Surface. *China J. Highway and Transport*, No. 2, 10-20.
- Lin X. X. (1989a), Study on Semi-Rigid Asphalt Pavement. Rep. of Key Sci. and Tech. Projects 85-65, Ministry of Communications, Beijing.
- MEPDG. ARA, Inc. ERES Consultants Division (2004), *Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, Washington, D.C., www.trb.org/mepdg/. Accessed September 12 of 2007.
- Migliori F. and Corté J-F. (1998), Comparative study of RTFOT and PAV aging simulation laboratory tests. *Transportation Research Record*, 1638, Transportation Research Board, Washington D.C., 56-63.
- Montepara A. (1999), A theoretical-interpretative model of the relationship between UV-radiation ageing of bitumen and viscosity variation. In: *Proc. of Eurobitume Workshop*, paper No. 075, Luxemburg.
- Montepara A. and Giuliani F. (2000), Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. In: *Proc. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures (Barcelona)*, 518-523.

- Nernas K. and Nunn M. E. (2006), A thermal pavement response model for top-down reflection cracking in composite pavements. In 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper No. 06-0127, Washington, D.C., January 2006.
- Rao Tangella R., Craus J., Deacon J. A. and Monismith C. L. (1990), Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. Rep. to Strategic Highway Research Program, Washington, D.C.
- Reyes F. A. (2003), Diseño Racional de Pavimentos. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1ra. Edición, Bogotá D.C., Colombia.
- Said S. F. (2005), Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1901, Washington D.C., 1-9.
- Schmidt R. J. and Santucci L. E. (1969), The effect of asphalt properties on the fatigue cracking of asphalt concrete on the Zaca-Wigmoretest Project. In: Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, PRPTA, Vol. 38, 39-64.
- Sebaaly P. E., Lake A. and Epps J. (2002), Evaluation of low-temperature properties of HMA mixtures. Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, No. 6, 578-586.
- SHELL (1978), International Petroleum Company. Shell Pavement Design Manual, Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic. London (U.K.).
- Shen J., Amirghani S. and Tang B. (2006), Influence of accelerated aging test temperature on the properties of binders. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 7, Issue 3, 191-198.
- Shiau J-M., Tia M., Ruth B. E. and Page G. C. (1991), Characterization of age-hardening potential of asphalt by using Corbett-Swarbrick asphalt fractionation test. Transportation Research Record, 1323, Transportation Research Board, Washington D.C., 53-60.
- TAI-The Asphalt Institute (1982), Research and Development of the Asphalt Institutes Thickness Design Manual. MS 1, 9th Ed. College Park, Md.
- TRL-Transport Research Laboratory (1993), A guide to the structural design of bitumen surfaced roads in tropical and subtropical countries. Draft 4th edition.
- Verhasselt A. F. (1997), Field ageing of bituminous binders: simulation and kinetic approach. In: Di Benedetto, H., Francken, L., Proc. Fifth International RILEM Symposium, Mechanical Tests for Bituminous Materials, 121-128.
- Welborn J. Y. (1984), Physical properties as related to asphalt durability: state of the art. Transportation Research Record, 999, Transportation Research Board, Washington D.C., 31-36.