

Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica

Effect of ultraviolet radiation on an asphalt mixture's mechanical and dynamic properties

Oscar Javier Reyes Ortiz¹ y Javier Fernando Camacho Tauta²

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue el de determinar los efectos de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica. El estudio partió de la caracterización de los materiales y la determinación del porcentaje óptimo de asfalto con la metodología Marshall. Se fabricaron muestras de módulo dinámico, de ahuellamiento y de ley de fatiga, las cuales fueron sometidas a cuatro periodos de radiación ultravioleta en una cámara con condiciones ambientales controladas. Entre los resultados obtenidos se determinó que a mayor periodo de exposición de radiación ultravioleta la vida en ciclos de la mezcla disminuye, los módulos dinámicos aumentan entre 90 y 132 % y la deformación permanente aminora un 57 %, convirtiéndose así en una estructura más frágil.

Palabras clave: ley de fatiga, módulo dinámico, deformación permanente, radiación ultravioleta y mezclas asfálticas.

ABSTRACT

This research's main goal was to determine UV radiation's effects on a dense asphalt mixture's mechanical and dynamic properties. Individual material components were characterised and optimum asphalt content was obtained using Marshall's methodology. Dynamic modulus, rutting and fatigue tests were carried out using specimens previously subjected to UV radiation at different exposure times by using an aging chamber. It is worth stressing that greater UV exposure led to shorter mixture life cycles. The dynamic module increased between 90% and 132% and permanent deformation decreased by 57%, making it become a more fragile structure.

Keywords: fatigue law, dynamic module, rutting, UV radiation, asphalt mixture.

Recibido: abril 8 de 2008

Aceptado: octubre 27 de 2008

Introducción

La carretera constituye una infraestructura de uso cotidiano, que facilita la movilidad, comunicación y calidad de vida de los ciudadanos. En la actualidad es indispensable investigar en qué medida los componentes climatológicos afectan las propiedades mecánicas y dinámicas de las capas de rodadura de los pavimentos flexibles, al igual que otras variables ya ampliamente estudiadas; esto, con el fin de lograr mayor eficiencia en el desarrollo de las estructuras de pavimento y evitar daños prematuros que generarían gastos de mantenimiento no contemplados en el diseño del mismo.

El término envejecimiento se refiere al fenómeno global de evolución lenta e irreversible de la alteración de las propiedades físico-químicas del material; en el caso de ligantes asfálticos, esta alteración se inicia desde el proceso de producción, continúa durante la preparación y compactación de la mezcla asfáltica, prologándose durante el servicio de la vía, donde es causada principalmente por la aplicación de cargas, esfuerzos mecánicos y la acción del medio ambiente (oxígeno, radiación solar global, temperatura ambiente, agua, sales, ácidos, óxidos y organización estratigráfica). La celeridad y severidad de este proceso depende de la calidad de la materia prima (asfalto, agregado), cumplimiento de normas y especificaciones según el diseño, temperatura de mezclado, aplicación y

compactación, uso de aditivos y rejuvenecedores y mantenimiento preventivo (Afanasieva, 2002).

La radiación solar posee tres grandes clases de ondas de acuerdo con sus longitudes: ultravioleta (UV), visible (VIS), e infrarroja (IR). La longitud de onda de los rayos ultravioleta está entre 295 y 400 nm y representa aproximadamente un 7% de la radiación total. Una de las estaciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá está ubicada en las coordenadas 04°42'N y 79°09'W y a una altura de 2.546 msnm, donde la longitud de onda de los rayos ultravioleta es aproximadamente de 305 nm, y los datos observados de radiación en kWh/m²/día son los que aparecen en la Tabla 1 (González y Rodríguez, 2005).

Las primeras investigaciones realizadas en el área del envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas se enfocaron al desarrollo de ensayos y métodos que relacionaran el ligante asfáltico con los efectos de intemperie. Hasta la fecha, los investigadores han hecho ensayos en cuatro sistemas de envejecimiento: el primero, pruebas de oxidación; el segundo, envejeciendo en hornos a temperaturas elevadas; el tercero y el cuarto, con radiación infrarroja y ultravioleta (Bell, 1989). Para simular las condiciones de envejecimiento en un pavimento real, el sistema Superpave envejece el asfalto en laboratorio empleando el horno de película delgada rotativa (RTFO), que simula el endurecimiento por oxidación que ocu-

¹ Ingeniero civil, Universidad de Los Andes, Colombia. M.Sc., en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Colombia. Profesor asociado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. oreyes@umng.edu.co

² Ingeniero civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. M.Sc., en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Colombia. Profesor asistente, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. jcamacho@umng.edu.co

re durante el proceso de mezcla en caliente y su posterior colocación. Adicionalmente, se desarrolló un equipo de envejecimiento a presión (PAV), que se utiliza en el laboratorio para simular el severo envejecimiento que sufre el asfalto en el pavimento después de varios años de servicio. La medición de las propiedades físicas del asfalto son efectuados antes y después de someter las muestras a estos procesos, utilizando los siguientes equipos: reómetro de corte dinámico, viscosímetro rotacional, reómetro de flexión, tracción directa, ensayo de corte y tracción indirecta (SHRP, 1993).

Tabla 1. Valores de la radiación solar (kWh/m²/día) en Bogotá

Mes	H _o	H	H/H _o	H _b	H _b /H	H _d
Enero	9.5	4.66	0.49	2.69	0.58	1.96
Febrero	10.0	4.92	0.49	2.84	0.58	2.08
Marzo	10.4	4.18	0.40	2.10	0.50	2.08
Abril	10.4	3.97	0.38	1.91	0.48	2.06
Mayo	10.1	3.71	0.37	1.72	0.46	1.99
Junio	9.8	3.56	0.36	1.63	0.46	1.93
Julio	9.9	3.76	0.38	1.78	0.47	1.98
Agosto	10.2	3.98	0.39	1.94	0.49	2.04
Septiembre	10.3	4.04	0.39	1.99	0.49	2.06
Octubre	10.1	3.89	0.39	1.91	0.49	1.98
Noviembre	9.6	3.91	0.41	2.01	0.51	1.90
Diciembre	9.3	4.20	0.45	2.31	0.55	1.89
Anual	10.2	4.06	0.41	2.07	0.51	1.99

donde:

H_o: Radiación global

H: Radiación solar promedio diario

H_b: Radiación solar directa promedio diario

H_d: Radiación solar difusa promedio diario

El estudio del efecto en las propiedades reológicas de un asfalto colombiano de penetración 80-100 por radiación UV-B fue investigado mediante el empleo de técnicas de envejecimiento acelerado a través del weatherómetro. El procedimiento consistió en envejecer el asfalto en una cámara de rayos UV-B y someterlo a períodos de condensación. Acto seguido se determinaron sus propiedades en el reómetro de corte dinámico y se compararon con las iniciales. Los resultados obtenidos determinaron que existe un incremento del módulo complejo sin importar el periodo de exposición y que la profundidad de afectación de las mezclas alcanza 15 mm de espesor (Martínez, 2005).

Esta investigación se basa en la influencia de factores ambientales locales y su afectación directa en las mezclas asfálticas, como es el caso de la radiación ultravioleta emitida por el Sol hacia la superficie terrestre. Para ello, se parte del supuesto de que dicha radiación puede causar un envejecimiento del asfalto como material ligante, y por consiguiente, una modificación de las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla asfáltica. Para poder determinar en qué forma se ve afectada la mezcla, fue necesario simular en laboratorio la radiación ultravioleta que llega a Bogotá mediante una cámara que emite radiación ultravioleta y controla las condiciones de humedad y temperatura. Para determinar la relación entre el tiempo de exposición en la cámara y la radiación promedio en la ciudad de Bogotá se planteó una relación de intensidad de la radiación de la lámpara de rayos UV y la intensidad de la radiación en Bogotá. La intensidad de radiación promedio en Bogotá es de 425 W/m² (González y Rodríguez, 2005) y de la lámpara 18,14 W/m². La intensidad de radiación es la energía de radiación dividida por el producto del área de radiación por el tiempo de exposición (ecuación 1). En la investigación se determinó la relación entre las dos intensidades de radiación (ecuación 2)

y se planteó una relación de energías y tiempos de exposición, como aparece en la ecuación 3.

$$I_i = \frac{E_i}{t_i A_i} \quad (1)$$

donde

I_i= Intensidad

E_i= Energía de radiación

A_i= Área de radiación

t_i= Tiempo de exposición

$$I_L = 0.0427 I_B \quad (2)$$

donde

I_L= Intensidad de la lámpara

I_B= Intensidad de Bogotá

$$\frac{E_L}{t_L A_L} = 0.0427 \frac{E_B}{t_B A_B} \Rightarrow t_B = 0.0427 \frac{E_B t_L}{E_L} \quad (3)$$

Para calcular la energía de Bogotá y la del laboratorio se utiliza la ecuación de la energía de un fotón (Ecuación 4).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

donde

E= Energía

h= Constante de Planck= 6.6256*10⁻³⁴ Js

c= Velocidad de la luz

λ= Longitud de onda

Resolviendo para las ecuaciones 3 y 4, se obtiene la siguiente relación:

$$t_B = 28.5 t_L$$

donde

t_B= Tiempo de exposición en Bogotá

t_L= Tiempo de exposición de la lámpara

El artículo tiene como objetivo determinar el efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica con granulometría MD10, para lo cual se llevó a cabo un programa experimental con ensayos de módulo dinámico, ley de fatiga, ahuellamiento y Marshall sobre muestras expuestas a diferentes niveles de radiación.

Metodología y materiales

En la Figura 1 se presenta el diagrama de la metodología empleada en la investigación.

Selección de granulometría y tipo de asfalto

La granulometría empleada en la investigación corresponde a la denominada MD10 en la franja media (Figura 2) y es la empleada para la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá, según las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2005), y el asfalto utilizado es producido por la refinería de Barrancabermeja.

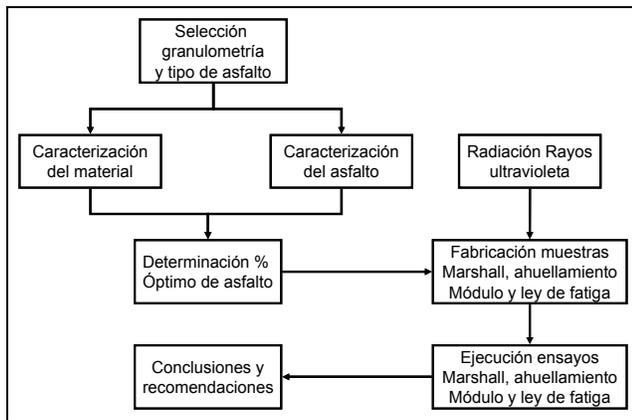


Figura 1. Metodología empleada en la investigación

dio se fijaron tres periodos de exposición, el primero de 450 horas (equivalente a 1,46 años), el segundo de 900 horas (equivalente a 2,93 años) y el tercero de 1.350 horas (equivalente a 4,4 años).



Figura 3. Equipo de radiación ultravioleta

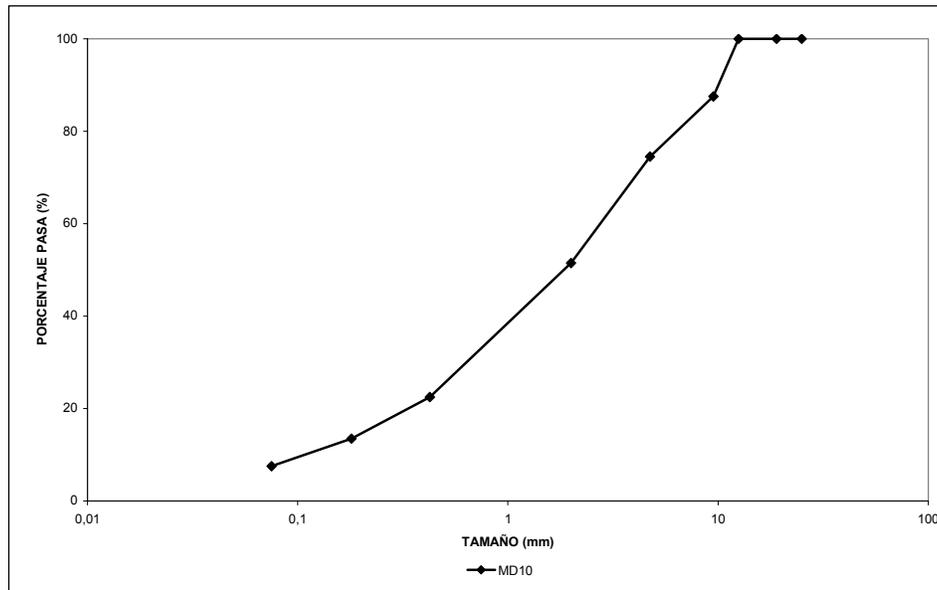


Figura 2. Granulometría empleada en la investigación MD10

Caracterización del granular y el asfalto

El material granular y el asfalto se caracterizaron realizando los ensayos de laboratorio que aparecen en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

Tabla 2. Características del material granular

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Absorción Agregado grueso	ASTM C 127	3.36%
Peso específico aparente	ASTM C 127	2.38
Absorción agregado fino	ASTM C 128	2.57%
Peso específico aparente	ASTM C 128	2.46
Desgaste Agregados	ASTM C 535	25.60%

Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta fue aplicada a los especímenes mediante lámparas de 30 W, diámetro 26 mm, radiación rayos UV de 11,2W, irradiancia 3.700 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ y una longitud de onda de 0,30 μm , como se observa en la Figura 3. La distancia entre las lámparas y los especímenes se mantuvo siempre constante a 0,5 m. La humedad relativa se mantuvo constante y corresponde a la humedad media relativa presente en la ciudad de Bogotá. Para el estu-

Análisis de resultados

El contenido óptimo de asfalto determinado con el ensayo Marshall fue de 6,0%. Con el porcentaje óptimo de asfalto se construyeron muestras Marshall, de módulos dinámicos, de ley de fatiga y de ahuellamiento para ser expuestas a diversos tiempos de radiación de rayos ultravioleta (450, 900 y 1.350 horas). Los resultados obtenidos para estabilidad, densidad y flujo aparecen en las Figuras 4, 5 y 6, respectivamente, y el tiempo utilizado para graficar los datos corresponden al equivalente en años.

De la Figura 4 se deduce que la estabilidad de la mezcla para los dos niveles de compactación (50 y 75 golpes) es similar hasta la exposición a radiación ultravioleta equivalente a tres años. Para la mayor exposición de radiación ultravioleta (4,4 años), la resistencia de las muestras aumenta en forma súbita, alcanzando el doble de magnitud para la mezcla compactada con 50 golpes y un incremento de aproximadamente del 30% para la compactada con 75 golpes.

Tabla 3. Características del asfalto

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Penetración	ASTM D 5-97	95
Ductilidad	ASTM D 113-99	120 cm
Viscosidad	ASTM D 4402	100 Pa-s
Punto de Ablandamiento	ASTM D 36-95	43°C
Punto de llama e ignición	ASTM D 3143-98	220°C y 225°C

La Figura 5 muestra que la densidad no aumenta significativamente con la radiación ultravioleta para la muestra compactada con 75 golpes. Para la muestra compactada con 50 golpes se observan incrementos de la densidad en la medida en que mayormente es expuesta a la radiación ultravioleta, llegando a un aumento de 4% para la exposición de 4,4 años.

La Figura 6 indica que sin importar el nivel de compactación, el flujo de las muestras disminuye en forma lineal entre mayor sea el tiempo de exposición a radiación ultravioleta, reduciendo la deformación casi en un 75%.

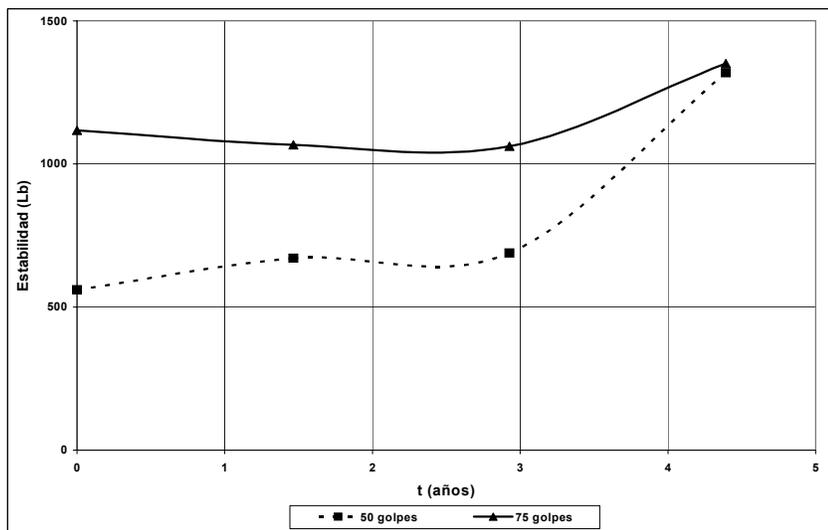


Figura 4. Estabilidad Vs. tiempo de exposición a radiación ultravioleta

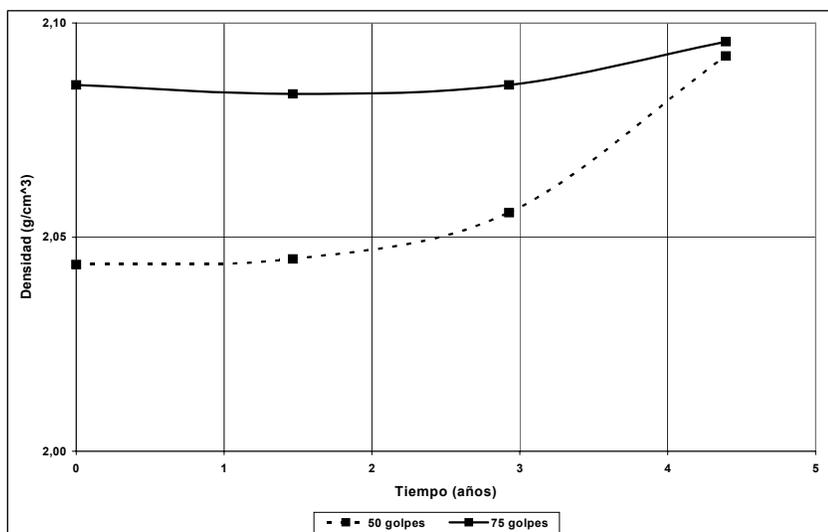


Figura 5. Densidad Vs. tiempo de exposición a radiación ultravioleta

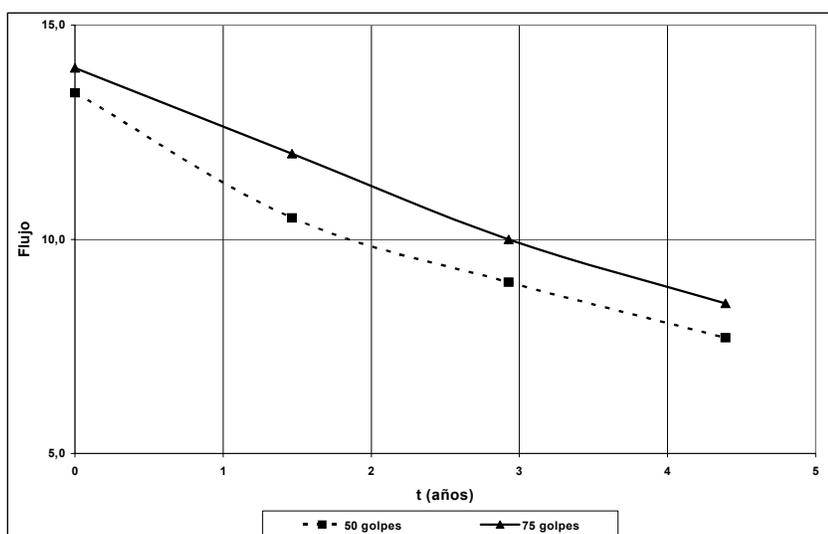


Figura 6. Flujo Vs. tiempo de exposición a radiación ultravioleta

En la Figuras 7 se aprecia que el ahuellamiento depende inversamente del nivel de exposición a los rayos UV. A mayor exposición, menor deformación permanente. La deformación permanente para el periodo de 4,4 años se redujo aproximadamente un 57%, para 2,9 años un 38%, y 26% para el periodo de 1,46 años.

El módulo resiliente aumenta con el tiempo de exposición a la radiación ultravioleta sin importar la frecuencia a la cual se desarrolle el ensayo de resiliencia, tal como se puede ver en las Figuras 8 y 9. Para las muestras con mayor exposición (4,4 años) y una frecuencia baja (0,5 Hz) se presentan los mayores incrementos del módulo, alcanzando un valor del 132%, y para la frecuencia alta (2,5 Hz) el incremento fue de 90%. Para los otros tiempos de exposición a radiación ultravioleta (1,46 y 2,93 años), los incrementos oscilan entre el 88 y el 24%.

De la Figura 10, ley de fatiga determinada con probetas trapezoidales a flexotracción y a 20 °C, se deriva que la pendiente de la ley de fatiga aumenta en la medida en que existe mayor exposición de la mezcla a los rayos ultravioleta; de igual manera, los niveles de deformación disminuyen. De este comportamiento se determina que la mezcla debido a la exposición de la radiación solar se vuelve más frágil y soporta menos ciclos de carga.

Conclusiones

De los ensayos realizados de estabilidad, densidad, flujo, módulo resiliente, ahuellamiento y ley de fatiga sobre muestras sometidas a diversos periodos de exposición a radiación ultravioleta, se puede concluir que:

La radiación ultravioleta envejece el asfalto, lo cual produce una estructura más frágil que se evidencia en una reducción de la vida útil de la mezcla asfáltica, como se aprecia en las leyes de fatiga.

La estabilidad Marshall aumenta con la exposición de los rayos ultravioleta, produciéndose un aumento en la rigidez de la mezcla. En las muestras compactadas a menores niveles de energía se evidencia mayor afectación.

El flujo de las muestras desciende en forma lineal sin importar la energía de compactación, llegando a alcanzar una disminución del 35%, lo que concuerda con los resultados obtenidos en las leyes de fatiga.

La deformación permanente de las muestras disminuye con el tiempo de exposición a radiación ultravioleta, produciéndose estructuras más susceptibles a la rotura frágil.

Los módulos resilientes determinados a variadas frecuencias y tiempos de exposición de radiación ultravioleta evidencian incrementos en su valor, siendo mayores los que tuvieron más tiempo

de exposición, lo cual se puede correlacionar con el comportamiento de las leyes de fatiga encontradas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, existe una incidencia de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla asfáltica; se constata que dentro del diseño se debería tener en cuenta la afectación del envejecimiento en el cálculo de los espesores del pavimento.

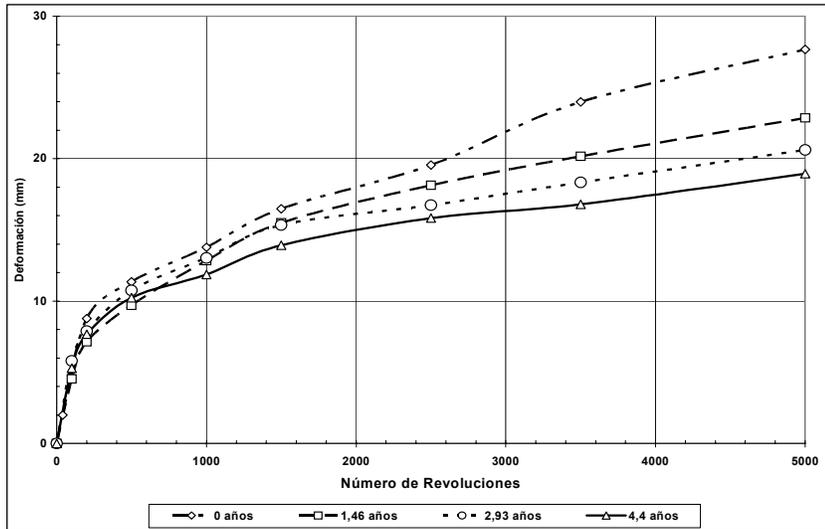


Figura 7. Ahuellamiento de muestras sometidas con variada exposición a radiación UV

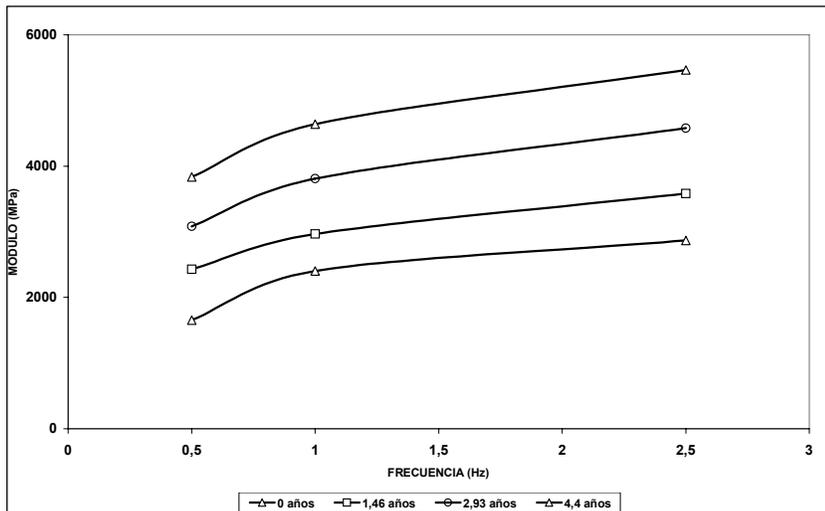


Figura 8. Módulo resiliente Vs. Frecuencia

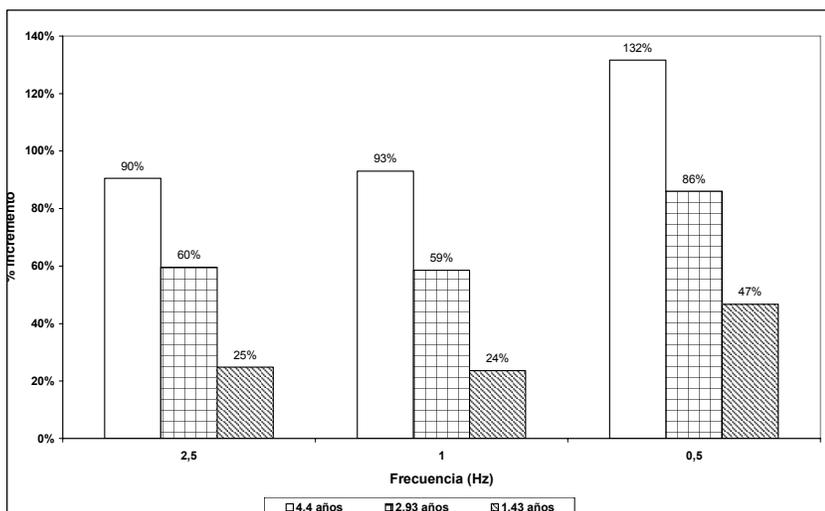


Figura 9. Incremento del módulo resiliente para diferentes frecuencias y periodos de exposición a radiación ultravioleta

En futuras investigaciones se analizará la influencia dentro del tipo de asfalto y la granulometría, así como al aumentar los periodos de radiación ultravioleta.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada por los ensayos realizados, y a los ingenieros Natalia Medina y Germán Rincón por los primeros resultados obtenidos en la investigación.

Nomenclatura

- A_i = Área de radiación
- c = Velocidad de la luz
- E = Energía
- E_i = Energía de radiación
- H : Radiación solar promedio diario
- h = constante de Planck = $6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js
- H_b : Radiación solar directa promedio diario
- H_d : Radiación solar difusa promedio diario
- H_o : Radiación global
- I_b = Intensidad de Bogotá
- I_i = Intensidad
- I_l = Intensidad de la lámpara
- t_b = Tiempo de exposición en Bogotá
- t_i = Tiempo de exposición
- t_l = Tiempo de exposición de la lámpara
- λ = Longitud de onda

Bibliografía

AFNOR., Qualité des sols. Analyse granulométrique par sédi- Afanasieva, Análisis de los modelos cinéticos de oxidación en el proceso de envejecimiento de los asfaltos., Memorias de las Terceras Jornadas Internacionales del Asfalto. Cartagena, Centro de Convergencias de Cartagena de Indias, Agosto, 2002. pp 1-18.

Asphalt Institute., Superpave Mix Design (SP-2)., Publisher Asphalt Institute Serie SP-2, Third Edition, 2001, pp 128.

Asphalt Institute., Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing., Publisher Asphalt Institute, Serie 1, Third Edition, 2003, pp. 90.

Bahia, H. A., Anderson, D. A., The pressure aging vessel (PAV) s test to simulate rheological changes due to field aging., Physical Properties of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241, John C. Harden, Ed. American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1994, pp52-67.

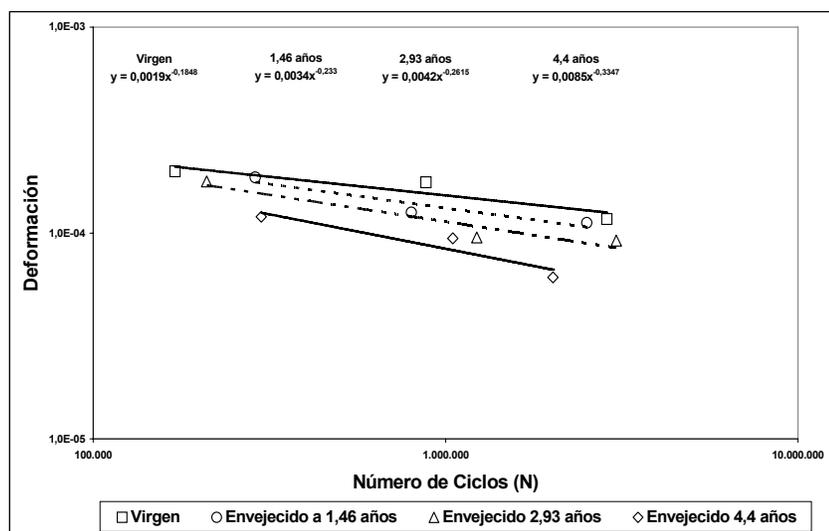


Figura 10. Ley de fatiga para el asfalto virgen y los envejecidos en diversos periodos, con radiación ultravioleta

Bell, C., Summary Report on Ageing of Asphalt-Aggregate Systems., Strategic Highway Research Program SHRP-A-305. RS-OSU-A003A-89-2, National Research Council, Washington D.C., November, 1989.

Instituto de Desarrollo Urbano-IDU., Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá., IDU ET 2005, Versión 1.0, abril, 2006.

Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. S., Hughes, C. S., Von Quintu, I. T., Moulthrop, J. S., Superior

performing asphalt pavement., The product of the SHRP asphalt research program, SHRP A-410, Strategic Highway Research Program 1993, pp. 156.

Khalid, H. A., A new approach for accelerated ageing of porous asphalt mixtures., Transport Journal, Proceedings Institution of Civil Engineers, Vol 153, No. 3, 2002, pp. 171-181.

Lee, M, Tia, M., Ruth, B., Page, G. C., Comparison between the aging processes for asphalt mixtures and those for asphalt binders., ASTM Special Technical Publication, 1322, 1997.

Martínez, G., Caicedo, B., Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas., Congreso Iberoamericano del asfalto, Laname, Costa Rica, 2005, pp. 1-17.

Medina, N., Rincón, G., Posible efecto de los rayos ultravioleta en las propiedades dinámicas y mecánicas de una mezcla asfáltica., Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada, 2004.

Montepara, A., Sangata, E., Tosi, G., Photochemical degradation of pure bitumen by UV radiation., 1 st Euroasphalt & Eurobitumen Stasbourg, E.E. 5.133, 1996.

Reyes, O., Camacho, J., Nieto, A., Incidencia de los rayos ultravioleta en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica., Simposio Colombiano sobre ingeniería de pavimentos. Manizales, Septiembre 3-7, 2007, pp. 1-17.

Rodríguez, H., González, F., Manual de Radiación Solar en Colombia, Vol II., Colombia, Rodríguez y González, Editores, Bogotá, febrero, 1994.