

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA MEZCLA MDC-19 DE ASFALTO 60/70 CON ADICIÓN DE FIBRAS KEVLAR®

## REVIEW OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF 60/70 ASPHALT WITH A MDC-19 MIX WITH KEVLAR® FIBER ADDITION

### RESUMEN

En el presente artículo se realizó un análisis experimental del comportamiento dinámico de mezclas asfálticas MDC-19, con adiciones de diferentes proporciones de fibras Kevlar® por vía seca, para así determinar el contenido ideal de fibras en la mezcla. Por lo anterior se desarrollaron cuatro fases, dentro de las cuales se encuentra: Primero, la caracterización de materiales granulares y del asfalto; segundo, la elaboración del diseño de la mezcla asfáltica por medio de la metodología Marshall; tercero, la elaboración de seis mezclas con dosificaciones de 0, 300, 400, 500, 600 y 700 gramos de fibra por tonelada de mezcla; y cuarto, la ejecución de los ensayos de módulo resiliente, ahuellamiento y fatiga en todas las mezclas. En donde se encontró que no hay una relación directamente proporcional entre el aumento de porcentajes de adición de fibras, con respecto a la mejora de las propiedades del asfalto, por lo que la adición que mejor comportamiento presentó fue de 400 gramos de fibra por tonelada de mezcla.

**Palabras clave:** Fibras Kevlar®, mezcla asfáltica MDC-19; módulo resiliente; ahuellamiento; fatiga.

### ABSTRACT

In this investigation an experimental analysis of dynamic behavior of MDC-19 asphalt mixture has been made with different proportions of Kevlar® fibers by dry, to determine the ideal content of fiber in the mixture. To achieve the purpose, the study was divided into four phases: First, characterization of granular materials and asphalt; second, asphalt mix design using Marshall methodology; third, preparation of six mixtures with dosages of 0, 300, 400, 500, 600 and 700 grams of fiber per ton of mixture; and fourth, performing tests of resilient modulus, runoff and fatigue, to all mixtures. Founding that there is no directly proportional relationship between the increase of fiber addition percentages with the improvement of asphalt properties, so the addition with better improvement was 400 grams of fiber per ton of mixture.

**Keywords:** Kevlar® fiber; MDC-19 asphalt mixture; resilient module; runoff; fatigue.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de estructurar pavimentos más resistentes y duraderos, ha generado el aumento de investigaciones en modificación de mezclas asfálticas, obteniendo resultados muy interesantes dentro de los cuales se encuentran, el aumento de la resistencia a la fatiga de las mezclas y la reducción de la rigidez a bajas temperaturas, lo cual previene la fisuración térmica [1] ofreciendo un mejor comportamiento durante el servicio ante la acción de las cargas más pesadas del tránsito, sin depender de las condiciones climáticas y disminuyendo costos de mantenimiento [2].

En las investigaciones realizadas sobre modificación de mezclas asfálticas, se encuentra la adición de fibras, como lo son los ensayos realizados en la universidad de Arizona en el año 2013, en donde se determinó que la viscosidad de los asfaltos modificados con fibras mejora en un 36.4% con respecto a los asfaltos convencionales, y que la penetración disminuye en un 19.4%, esto con una proporción de 500 gramos de fibras por tonelada de mezcla [3]. Igualmente en la investigación realizada por [4], se encontró que el uso de fibras como una adición, es una opción para disminuir las deformaciones y daños de los pavimentos, con el beneficio de obtener una vida útil más larga de la estructura.

Dentro del uso de fibras, la sintéticas tipo Kevlar® mejoran el comportamiento dinámico, aumentando el módulo resiliente, disminuyendo las deformaciones permanentes y retardando la falla por fatiga, obteniendo pavimentos con periodos de diseño mayores y aumentando la resistencia a la formación de grietas. Estas fibras presentan una tensión a la rotura 12 veces mayor que el acero estructural A36, y generan un refuerzo estructural a cualquier tipo de mezcla asfáltica, formando una malla tridimensional a lo largo de la capa asfáltica, logrando obtener un concreto asfáltico de alta tenacidad. Durante este proceso las fibras interactúan con el cemento asfáltico, generando una mayor cohesión con los agregados pétreos y logrando una distribución completa homogénea en la mezcla asfáltica [5].

Las fallas por fatiga, deformación y ahuellamiento, son las mayores causas del mantenimiento y rehabilitación de vías en la ciudad, por lo que el presente estudio pretende analizar el comportamiento dinámico de una mezcla tipo MDC-19 con asfalto tipo 60/70 de Barrancabermeja, utilizando adición de fibras sintéticas tipo Kevlar®, trabajo que a nivel científico no se ha desarrollado en Colombia, a fin de buscar alternativas que permitan mejorar la vida útil de los pavimentos, este estudio se realizará sobre la capa de rodadura debido a que en ella se presentan las fallas.

# 1. MATERIALES Y MÉTODO

## 1.1. Caracterización de los materiales

Se usó asfalto convencional de penetración 60/70 como ligante, cumpliendo los requerimientos del Artículo 400-13 del Instituto Nacional de Vías, suministrado por la empresa MPI (Manufacturas y procesos industriales, especialistas en asfaltos). Cada una de las normas con las cuales se caracterizó el mismo, se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Caracterización asfalto 60/70.

Ensayo	Norma	Unidad	Especificación	Resultado
Penetración	INV E 706 - 13	mm/10	Min 60 - Max 70	60
Punto de ablandamiento	INV E 712 - 13	°		50,8
Viscosidad Brookfield	INV E 717 - 13	P	Min 1500	2090
Viscosidad absoluta	INV E 716 - 13	P	Min 1500	2254
Índice de penetración	INV E 724 - 13		-1 a 1	-0,57
Peso específico	INV E 707 - 13	g/cm <sup>3</sup>		1,009
Ductilidad	INV E 702 - 13	cm	Min 100	137,4
Contenido de agua	INV E 704 - 13	%	Max 0,2	0.0

**Fuente:** Elaboración propia.

La proporción y gradación de los agregados, son los factores más importantes de la mezcla asfáltica, por lo tanto es fundamental contar con materiales de calidad que conformen la estructura de la mezcla, debido a que gradaciones finas generan asfaltos con mejor comportamiento ante fatiga y con mejor respuesta ante resistencia al corte [6-7]. Teniendo en cuenta lo anterior, los materiales utilizados en presente estudio cumplen con la calidad necesaria para ser utilizados en mezclas asfálticas, caracterizados con las normas que se presentan en la Tabla 2. Estos fueron obtenidos de explotación de los depósitos aluviales del Río Luisa en el Guamo, Tolima, y están compuestos por gravas y arenas de origen volcánico, pertenecientes a depósitos fluvio-volcánicos relativamente recientes, conocidos como los Abanicos del Guamo y El Espinal, que cubren otras unidades más antiguas [8].

**Tabla 2.** Caracterización del agregado pétreo.

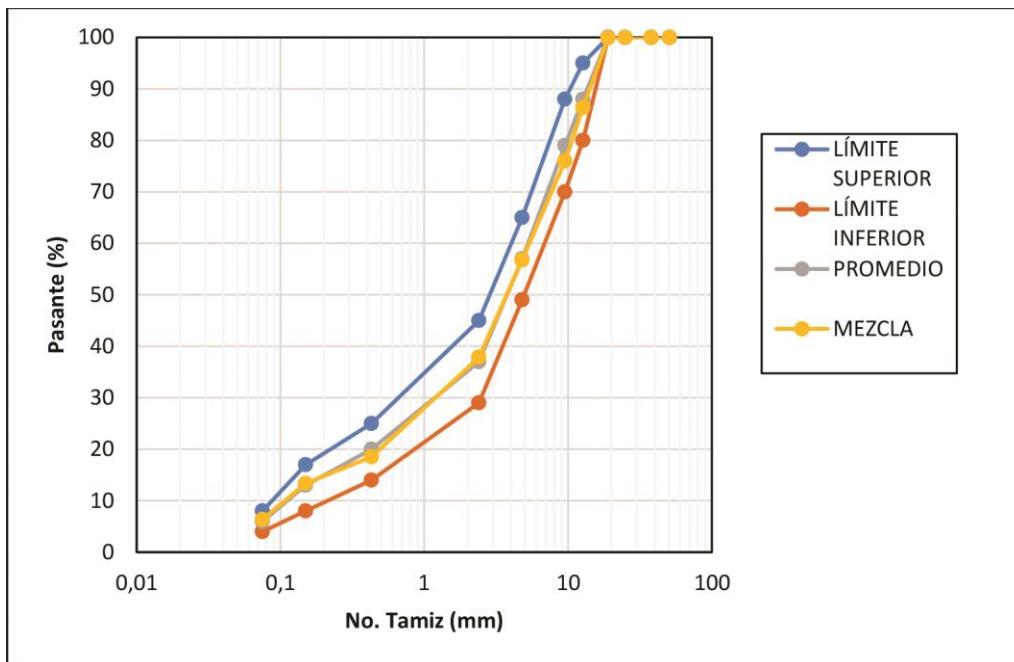
Ensayo	Norma	Unidad	Especif.	Resultado	
Desgaste Máquina de los ángeles	INV E 235 - 13	%	Max 25	17,15	
Partículas Fracturadas	INV E 229 - 13	%	Min 60	94,23	
Índice de alargamiento	INV E 230 - 13	%	Max 35	21,20	
Índice de aplanamiento		%	Max 35	19,11	
Gravedad Específica y absorción agregados finos	INV E 222 - 13	-	Gs	2,63	2,56
		%	Abs.	2,30	4,37
Gravedad Específica y absorción agregados gruesos	INV E 223 - 13	-	Gs	2,62	
		%	Abs.	1,57	

**Fuente:** Elaboración propia.

## 1.2. Diseño de mezcla asfáltica

Teniendo en cuenta los requerimientos del artículo 450-13 del Instituto Nacional de Vías, se determinó la combinación óptima de diseño que cumpliera los criterios granulométricos y de empaquetamiento de los agregados pétreos en la mezcla, establecidos en el método Bailey [9].

El diseño de mezcla se realizó por el método Marshall, en donde inicialmente se calcularon las curvas granulométricas para las gravas de trituración y para el material grueso y fino, estas debían cumplir con la franja granulométrica correspondiente a la mezcla MDC-2 en donde se tiene como referencia los valores límites correspondientes a la gradación de acuerdo con los requerimientos INVIAS 2013, con estas granulometrías se calculó la curva general, variando los porcentajes de cada material para ajustar la curva de la mezcla MDC-19, como se presenta en la Figura 1.



**Figura 1.** Curva granulométrica MDC - 19  
**Fuente:** Elaboración propia.

Luego se diseñó la mezcla asfáltica siguiendo la especificación INVIAS, dosificando 3 probetas cilíndricas de 4" de diámetro y 2.5" de altura por cada porcentaje de asfalto, con 6 porcentajes de asfalto entre 4 y 6.5%, variando estos cada 0.5%, para un total de 18 probetas. En este diseño se tuvo en cuenta un nivel de tránsito NT3, con una temperatura de mezcla de 150°C y de compactación de 140°C. Para determinar la gravedad específica BULK, se aplicaron 75 golpes para cada probeta, las cuales fueron compactadas con martillos de impacto de base circular (diámetro de 98.4 mm, peso de 10 lb y

altura de caída de 457.2 mm), los resultados del ensayo realizado se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Diseño Marshall.

Ensayo	Unidad	Especificación	Resultado
Contenido de Asfalto	%		5,20
Estabilidad	N	> 8.800	21.568
Volumen de vacíos en el agregado mineral	%	> 15,00	15,10
Flujo	Mm	2,0 – 3,5	3,3
Densidad	g/cm <sup>3</sup>		2.380
Vacíos con aire	%	4,0 – 6,0	5,0
Vacíos llenos de asfalto	%	65 – 75	70
Estabilidad / Flujo	kN/mm		5,9

**Fuente:** Elaboración propia.

### 1.3. Tipos de mezclas y ensayos dinámicos

Se decidió trabajar con seis tipos de mezclas, la primera mezcla corresponde a la mezcla asfáltica realizada por metodología Marshall, la segunda mezcla fue de 500 g de fibras / T de mezcla como se sugirió en el estudio de [3], y las cuatro mezclas restantes corresponden porcentajes 20 y 40 superiores e inferiores de la segunda mezcla. Para cada tipo de mezcla se realizó un análisis del comportamiento dinámico por medio de los ensayos de módulo resiliente, ahuellamiento y fatiga.

Las fibras Kevlar® se adicionan por vía seca cuando el agregado pétreo se encuentra caliente para que se fundan con el agregado y cumplan su función de proporcionar mejor adhesión entre el agregado y toda la mezcla asfáltica [10].

El ensayo de módulo resiliente, se desarrolló por deformación controlada según la Norma INV E 749-13, en el Nottingham Asphalt Tester, a tres diferentes frecuencias (2.5, 5 y 10 Hz) y tres diferentes temperaturas (10°C, 20°C y 30°C), en tres probetas tipo Marshall para cada tipo de mezcla, con un total de 18 probetas; se aplicó una carga haversiana con 0.1 s de carga y 0.9 s de descarga o relajación.

El ensayo de ahuellamiento se desarrolló en 9 probetas según la norma Francesa NF P 98-253-1, a 42 rpm con una presión de llanta de 0.662 MPa, una presión por eje de 13 T, y una temperatura de ensayo de 60°C considerada como la temperatura interna de la mezcla en servicio, se midieron las deformaciones a 16 diferentes tiempos (1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos).

El ensayo de fatiga se desarrolló según la Norma Francesa NF P 98-261-1 a deformación controlada, el cual consiste en la aplicación de una deformación sinusoidal regida por la Ecuación (1), en la parte superior de una probeta de forma trapezoidal empotrada en su base. Se realizaron 12 probetas por tipo de mezcla para evaluar 4 puntos a 3 diferentes deformaciones ( $90 \times 10^{-6}$ ,  $150 \times 10^{-6}$  y  $220 \times 10^{-6}$ ), con una frecuencia de 10 Hz a temperatura ambiente, esto último según la investigación desarrollada por [11].

$$z = z_0 \text{sen}(wt) \quad (1)$$

#### 1.4. Selección del porcentaje de adición

Luego de la caracterización de la mezcla dinámicamente, se determinó el contenido de fibras Kevlar® con el cual se encontró el mejor desempeño de las mezclas asfálticas. Esto se logró analizando los resultados de cada porcentaje de fibras, para cada uno de los ensayos comparados con los resultados de la muestra convencional, para luego calcular el aumento de desempeño de cada propiedad por porcentajes de fibras, el porcentaje de fibras Kevlar® que en conjunto presentó los mejores resultados fue el contenido objeto principal de este estudio, apoyados también con el diseño de dos estructuras de pavimentos mediante el método racional, de esta forma se hizo la comparación de los diferentes espesores de capas de rodadura con los diferentes porcentajes de fibras Kevlar®, elaborando de nuevo el ensayo Marshall para verificar los resultados y así confirmar la selección del porcentaje de adición de fibras.

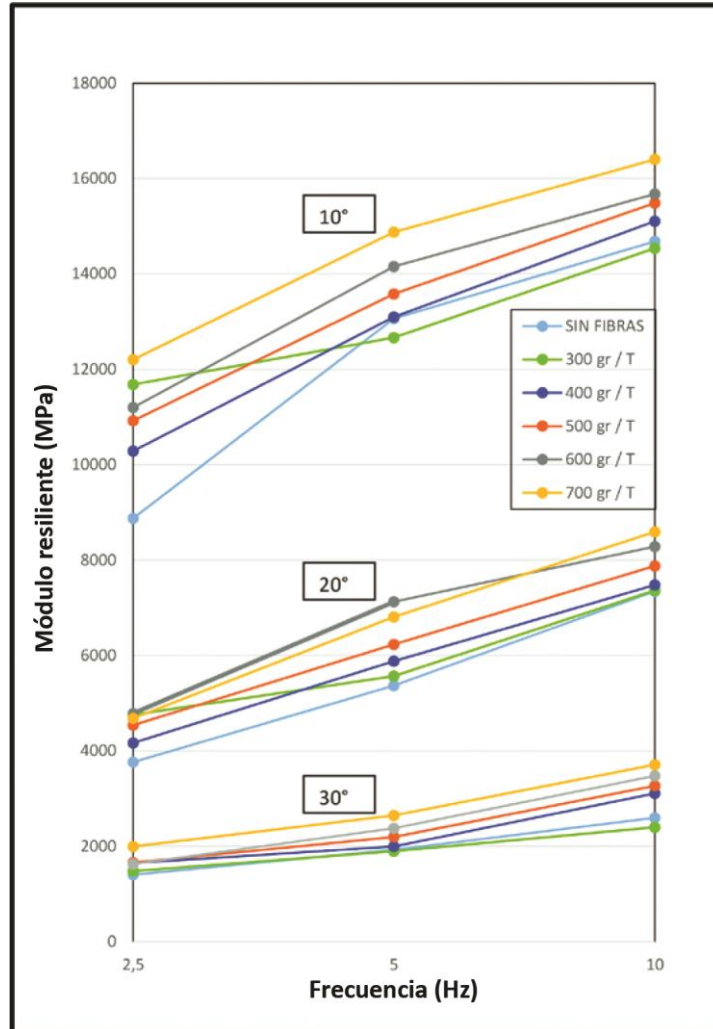
## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3, se observan valores altos de estabilidad, pero medios en cuanto a flujo, lo que según [12] es una mezcla rígida con poca deformación. Debido a que según este autor, las mezclas con valores bajos de flujo pero altos de estabilidad Marshall, son demasiado rígidas y por lo tanto frágiles para un pavimento en servicio.

#### 2.1. Módulo Resiliente

Para el ensayo de módulo resiliente se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 2, en donde se observa que el contenido de fibras rigidiza las mezclas, como lo presentó en sus estudios [3-5]. En este ensayo, los mayores módulos se presentaron con las mayores frecuencias y con respecto a las temperaturas, a  $10^\circ$  que es la menor temperatura, se observó que la mezcla con adición de 700 g / T, aumentó su módulo en un 11.63% con respecto a la mezcla convencional, y a  $30^\circ$  que es la mayor temperatura presentó un aumento del 42.92%.

Lo anterior lleva a deducir que el comportamiento de las fibras es ideal para tráficos altos, y presentan un buen desempeño para altas temperaturas. Como lo estudió [5], los asfaltos modificados con fibras mejoran hasta en 35% la viscosidad con respecto a las mezclas convencionales, por tal razón los hacen menos susceptibles a los cambios de temperatura.



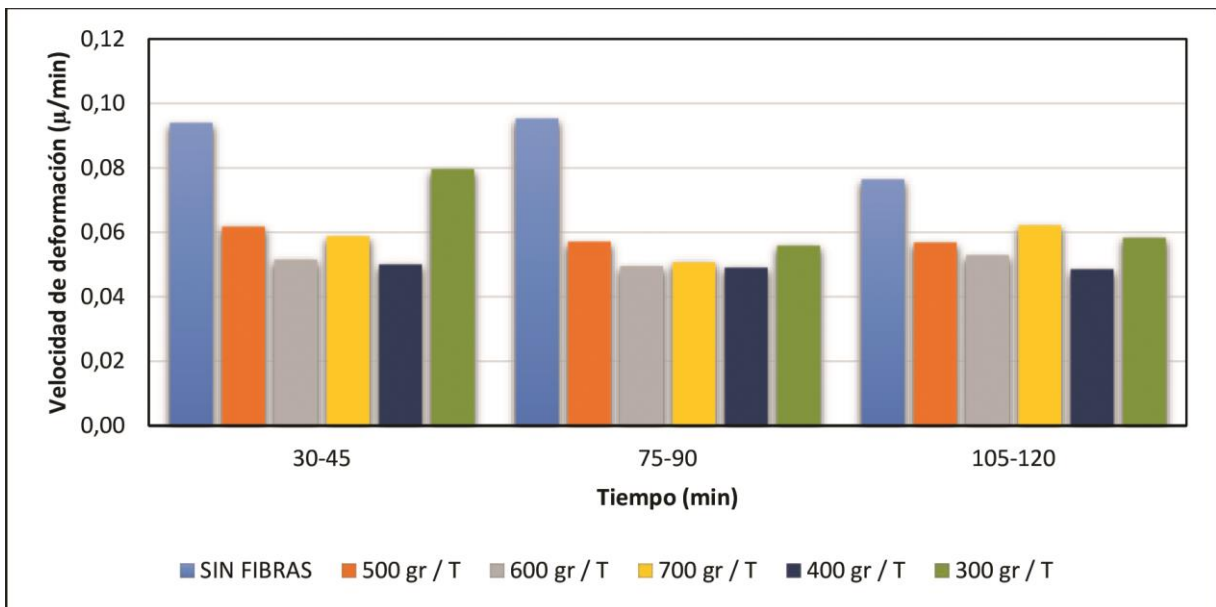
**Figura 2.** Evolución módulo resiliente de la mezcla MDC-19, con temperatura y frecuencia de carga.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.2. Ahuellamiento

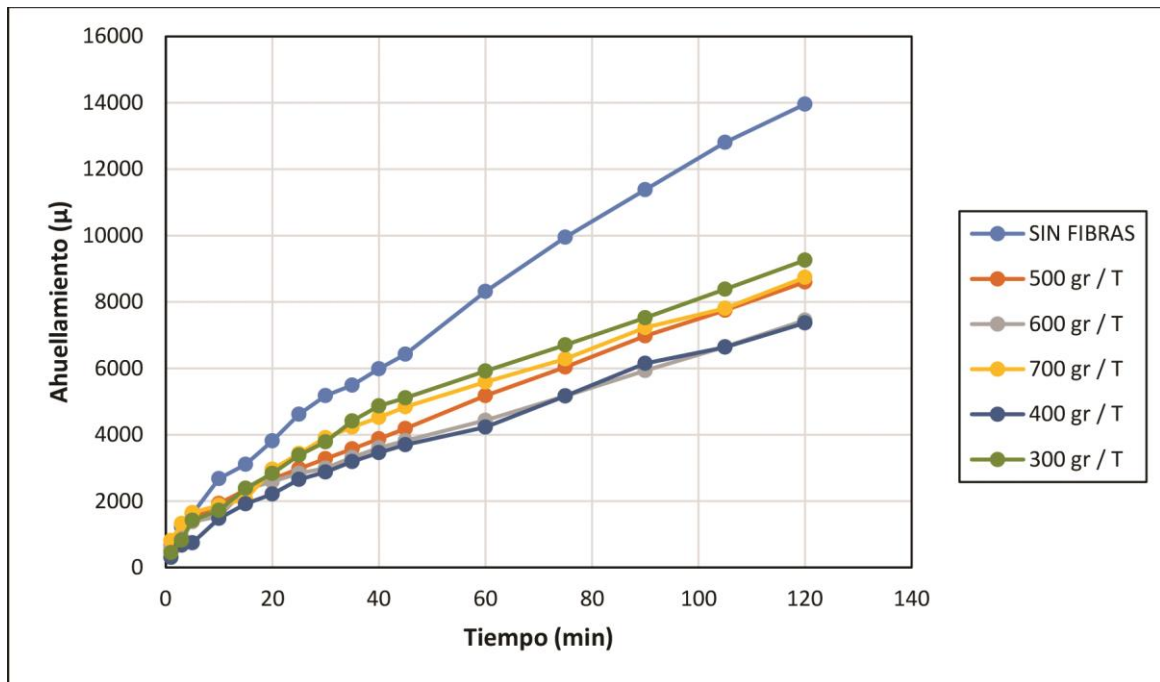
En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de deformación permanente o ahuellamiento para los diferentes tiempos evaluados, en donde se observa que las mezclas con fibras Kevlar® tienen un mejor comportamiento ante el efecto de ahuellamiento que la mezcla convencional, ya que esta última es más susceptible a deformación permanente, igualmente los contenidos de adición de 400 y 600 g de fibras Kevlar® / T de mezcla, responden mejor ante este efecto.

Al evaluar la velocidad de deformación en los tiempos críticos (30-45, 75-90 y 105-120 minutos) para las diferentes mezclas (Figura 4), se observa en todos los tiempos que la mezcla convencional presenta mayor velocidad de deformación que las mezclas con adición de fibras, y que las mezclas adicionadas con 400 y 600 g de fibras Kevlar® / T de mezcla presentan la menor velocidad de deformación, al igual que en la Figura 4. Todas las muestras adicionadas mejoran ante el ahullamiento con respecto a la mezcla convencional, debido a que las fibras reducen sustancialmente el efecto de deformación permanente en las mezclas asfálticas como lo dedujeron en su estudio [13-14]. Aunque según [15], el que una mezcla asfáltica presente un alto módulo, disminuye considerablemente las deformaciones por efecto de las cargas, pero los resultados que mejor comportamiento tuvieron fueron los modificados con 400 g / T, esto debido a que la reorganización estructural que forman las fibras en la mezcla asfáltica puede variar negativamente cuando el contenido de fibras es excesivo.



**Figura 3.** Velocidades críticas de deformación.  
**Fuente:** Elaboración propia.



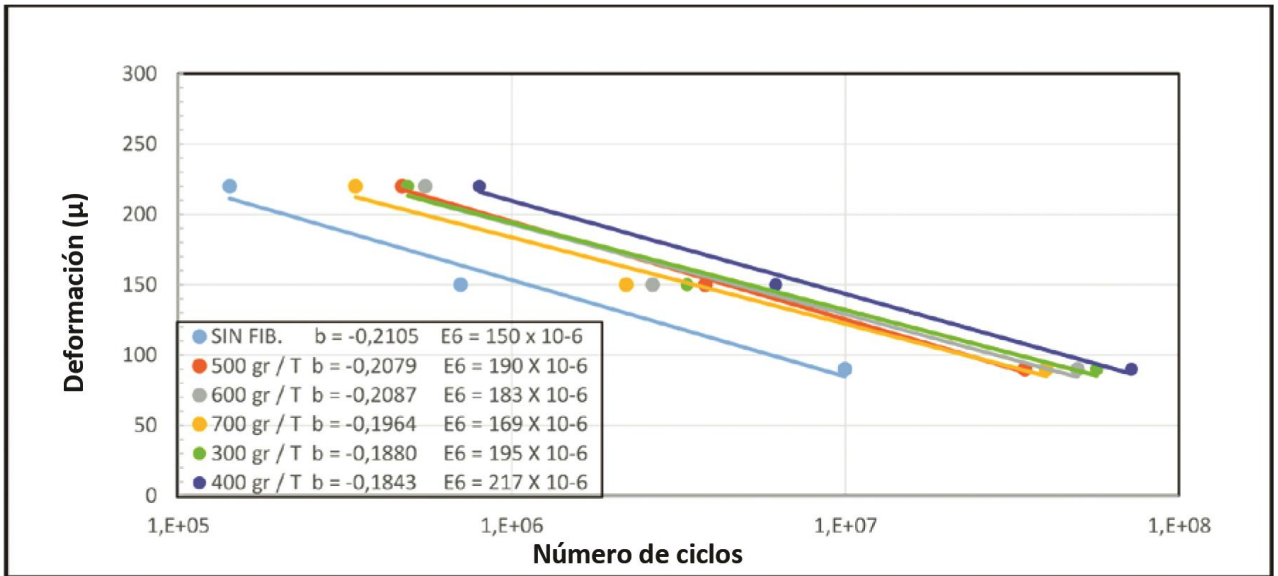


**Figura 4.** Deformación vs tiempo de aplicación de carga.  
**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.3. Fatiga

Para el diseño racional de pavimentos, es importante determinar la deformación que permite cada mezcla al millón de ciclos, dato que además permite diseñar la estructura del pavimento [16], para cada mezcla este valor se ve reflejado en la Figura 5. Igualmente es fundamental la pendiente de fatiga “b”, la cual es una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga, se considera que una mezcla asfáltica es eficiente en este aspecto cuando dicho valor es inferior a  $b=-0,25$ , en este estudio presenta un valor de  $-0,2105$  en la mezcla convencional, y en las mezclas con 300 y 400 g / T de fibras Kevlar®, se obtienen valores de  $b=-0,1880$  y  $b=-0,1843$  respectivamente como se observa en la Tabla 4, comprobando el buen desempeño de las fibras ante la repetición de cargas en estas dosificaciones. En la mezcla asfáltica con adición de 400 gramos de fibras Kevlar® / T, se presenta un equilibrio entre rigidez, viscosidad y distribución 3D de las fibras en la mezcla, razón por la cual la mezcla presenta mejor desempeño ante esta propiedad.

En cuanto a los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga, se puede observar en la Figura 5 que las mezclas con adición de fibras mejoran el comportamiento desde un 20% hasta un 44,67% con respecto a la mezcla convencional, además se puede observar que la mezcla con mayor adición de fibras resiste menor número de ciclos, con respecto a las mezclas adicionadas.



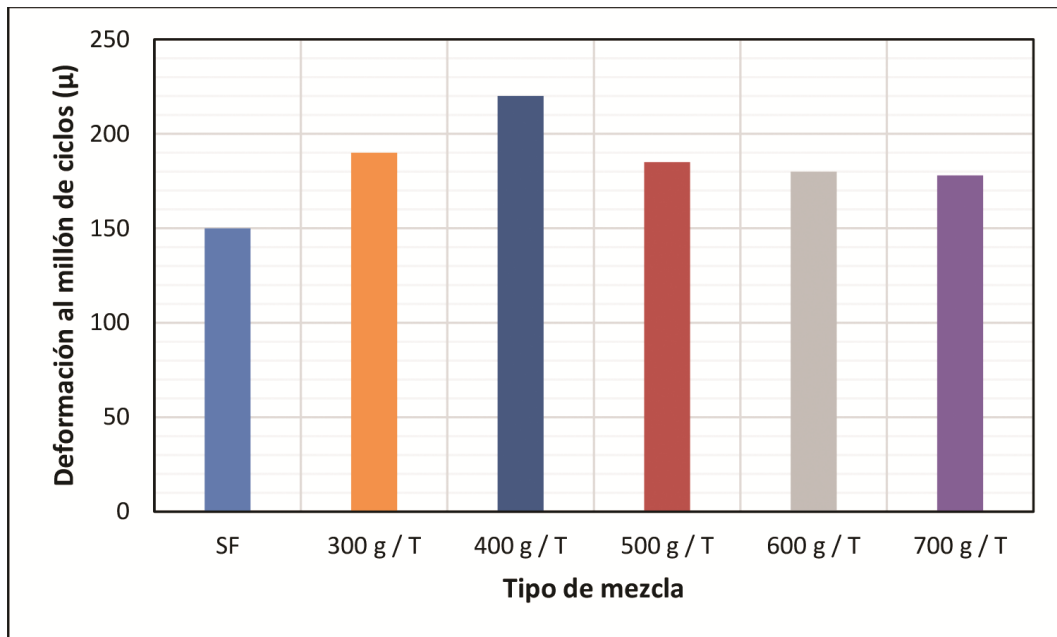
**Figura 5.** Leyes de fatiga para todas las mezclas dosificadas y convencionales.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4.** Diseño Marshall.

Tipo de mezcla	b
Convencional	-0.2105
300 g / T	-0.188
400 g / T	-0.1843
500 g / T	-0.2079
600 g / T	-0.2087
700 g / T	-0.1964

**Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 6, se observa que las mezclas adicionadas con fibras Kevlar® presentan un aumento en la deformación al millón de ciclos con respecto a la muestra control, y las mezclas con menores adiciones presentan los mayores aumentos de las fibras adicionadas, lo que corresponde a los valores obtenidos en los módulos resilientes, en donde la mezcla con adición de 700 g / T presentó el mayor módulo y menor incremento ante el comportamiento de fatiga.



**Figura 6.** Incremento de desempeño de fatiga de las mezclas con fibra.

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Al determinar el módulo resiliente de las mezclas asfálticas con las diferentes dosificaciones de fibras, se concluye que el contenido de 700 gramos de fibras Kevlar® / T de mezclas asfáltica, presenta el módulo más alto debido a la rigidez que las fibras proporcionan a la mezcla, y el efecto del asfalto modificado con ellas que reduce la penetración.

A mayor temperatura y frecuencia, mejor el desempeño de las mezclas con la adición de las fibras Kevlar®, lo cual genera un mayor beneficio en los pavimentos con tráficos medios y altos para temperaturas elevadas, debido a que la propiedades de tensión, rotura y temperatura de descomposición de las fibras, se transmiten a la mezcla (asfaltos y agregados).

La reorganización estructural que se logra con las fibras formando una malla tridimensional a lo largo de la capa asfáltica, puede variar negativamente en cuanto a la viscosidad cuando el contenido de fibras es alto: El mismo comportamiento obtenido en ahuellamiento con altos contenidos de fibras.

El contenido de 400 gramos de fibras Kevlar® / T de mezcla asfáltica, presenta menor deformación permanente en la mezcla asfáltica MDC-19 con asfalto 60/70. Proporción que se vio reflejada tanto en la deformación máxima, como en cada uno de los tiempos críticos en el ensayo de ahuellamiento, lo que garantiza una deformación baja y constante a lo largo de la vida útil del pavimento.

El contenido de 400 gramos de fibras Kevlar® / T de mezcla asfáltica, tiene el mejor desempeño ante el comportamiento de fatiga, ya que la deformación que

permite el millón de ciclos es superior en más del 44% con respecto a la mezcla convencional y con una pendiente de  $b=-0,184$ .

El porcentaje de fibras Kevlar®, que mejor refleja el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas MDC-19 con asfalto 60/70, es el de 400 gramos de fibras Kevlar® / T de mezclas asfáltica, ya que en conjunto presenta una mezcla rígida con baja deformación, tolerante a la fatiga y estructuralmente económica, logrando reducir espesores de carpetas asfálticas.

## REFERENCIAS

- [1] Rondón, H.R. (2007). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Revista Infraestructura Vial digital*, 10-20.
- [2] Montejo, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos*. Bogotá, Colombia: Universidad católica de Colombia.
- [3] Kaolush, K.E. (2013). *Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests*. En: <http://www.forta-fi.com/pdfs/FORTA-FI-ASU-Report.pdf>.
- [4] Reyes, O., y Troncoso, J. (2005) Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras. *Revista ciencia e ingeniería neogranadina*.
- [5] Kaolush, K.E., Biligiri, K.P., Zeiada, W.A., Rodezno, C., Dwivedi, S., Reed, J., y Cary, C. (2008). *Evaluation of FORTA Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests—Evergreen Drive, Tempe, Arizona*. Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe.
- [6] Sousa, J.B., Harvey, J., Painter, L., Deacon, J.A., y Monismith, C.L. (1998). *Evaluation of laboratory procedures for comapcting asphalt-aggregate mixtures*. Report SHRP-A/UWP91-523, University of California – Berkeley, September.
- [7] Haddock, J., Pan, C., Feng, A., y White, T. (1999). Effect of gradation on asphalt mixture performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1681), 59-68.
- [8] Alcaldía Municipal del Guamo (2014). POT, Guamo, Tolima.
- [9] Miranda, L., Rubio, B., Jiménez, R., Enríquez, L., y Loma, J. (2012). Método de dosificación Bailey. Aplicación a las mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA). VII Jornada Nacional. ASEFMA 2012.

- [10] Haouili, S. (2014). "Investigación de mezclas asfálticas en caliente reforzadas con fibras Forta-Fi". mePresentado por: Sustainable Infrastructure Solutions s.a.s., Bogotá, Colombia.
- [11] Rondón, H.A., Reyes, F.A., Figueroa, A.S., Rodríguez, E., Real, C.M., y Montealegre, T. A. (2012). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Infraestructura Vial*, Volumen (10).
- [12] Cáceres, C.A. (2007). *Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México*. Universidad de las Américas Puebla. San Andrés Cholula.
- [13] Matthews, J.M., y Monismith, C.L. (1992). The effect of aggregate gradation on the creep response of asphalt mixtures and pavement rutting estimates. In *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. ASTM International.
- [14] Bernier, A., Zofka, A., & Yut, I. (2012). Laboratory evaluation of rutting susceptibility of polymer-modified asphalt mixtures containing recycled pavements. *Construction and Building Materials*, 31, 58-66.
- [15] Figueroa, A.S., Fonseca, E.B., y Reyes, F.A. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y universidad*, 13(1), pp. 45-70.
- [16] Lizcano, F.A. (2012). *Diseño racional de pavimentos*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.