

Estudio de la variación del módulo dinámico y la fatiga en mezclas asfálticas densas hechas con diferentes tipos de asfalto y agregado

Study of variation of the dynamic modulus and fatigue life in dense asphalt mixtures made with different types of asphalt and aggregate.

Rey Adame¹, Jorge Alarcón¹, Pedro Limón¹, Israel Sandoval¹, Ignacio Cremades¹

¹Lasfalto S. de R. L. Grupo Surfax, Zapopan, Jalisco, México.
omar.adame@lasfalto.com.mx, telefono +52 33 3684 7304 ext 134

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido
24-04-2017
Aceptado
18-08-2017
Publicado
17-10-2017

Palabras Clave:
Módulo Dinámico
Vida a fatiga
Deformación
Creep repetido

Article history:

Received
24-04-2017
Accepted
18-08-2017
Available
17-10-2017

Keywords:
Dynamic modulus
Fatigue life
Rutting
Creep recovery

Resumen

En los últimos años en México se implementó una metodología de diseño de mezclas asfálticas densas de alto desempeño, con el objetivo de mejorar las técnicas de pavimentación, reducir los costos de operación y mantenimiento de los pavimentos flexibles, alcanzar los resultados obtenidos en países desarrollados y principalmente contar con una metodología que se asocie a las condiciones imperantes en la República Mexicana. El "protocolo AMAAC" basado en las teorías empírico-mecanicistas cuenta con un parámetro definido como módulo dinámico y fatiga, datos importantes en el diseño de estructuras de pavimentos flexibles y control de calidad. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos ha sido un parámetro difícil de obtener ya que hasta el momento no son suficientes los laboratorios que cuentan con la infraestructura para poder calcular dichos valores. Es por eso que en este trabajo se analizaron valores de módulo de dos tipos de agregados pétreos representativos para el país, como son el basalto y la andesita y así obtener valores de estos. Además, se analizó el efecto de la utilización de asfaltos modificados, asfaltos endurecidos y un asfalto convencional. Los resultados obtenidos hasta este punto demuestran la importancia del uso de asfaltos modificados para poder obtener mezclas de alto módulo. Además, se demuestra la importancia de evaluar los asfaltos mediante la clasificación "Jnr" y así poder definir la capacidad de un asfalto a desempeñarse bajo diferentes niveles de tráfico. Por otra parte, los valores obtenidos fueron introducidos en un método de diseño de estructuras de pavimento comúnmente usado por los ingenieros dedicados al diseño de estructuras de pavimento en México, como es el desarrollado por la UNAM (Universidad Autónoma de México), DISPAV-5, en el cual se analizaron los valores de módulo para estructuras de pavimento capaces de soportar intensidades de tráfico baja, mediana y alta. Además de determinar el costo-beneficio de las diferentes mezclas. Obteniendo resultados que demuestran la importancia de contar con agregados pétreos y asfaltos de buena calidad debido a que impactan directamente en la calidad de un pavimento así como en los costos y vida a fatiga. Finalmente, el uso de asfaltos modificados solo incrementa el costo inicial en uno por ciento lo que está más que claro que el uso de asfaltos modificados no solo aumenta la vida a fatiga sino que ahorra los costos de mantenimiento y reparación en la estructura.

Abstract

In recent years in México was implemented a design methodology for High performance asphalt mixtures in order to improve pavement techniques, reduce operating costs and maintenance flexible pavements, achieve results in developed countries and mainly have a methodology which is associated to Mexican conditions, the protocolo AMAAC (designed by Mexican Asphalt Association) based mechanistic-empirical theory have the dynamic

modulus and fatigue life. Important data in flexible pavements design and quality control. However, despite the efforts it has been a difficult parameter to get and the moment the laboratories that have the infrastructure to calculate these values are not enough. In this research was analyzed dynamic modulus values of two representative materials for the country: andesite and basalt, and obtain values of these. Furthermore, the effect of the use of modified asphalts is analyzed, hard asphalt and conventional asphalt. The results obtained up to this point demonstrates the importance of using modified asphalt in order to obtain mixtures of high modulus values. In addition, the importance of assessing asphalts is demonstrated by the "Jnr" rating and thus to define the ability of asphalt perform under different traffic levels. Moreover, the values obtained were introduced into a method of designing pavement structures commonly used by engineers dedicated to designing pavement structures such as developed by the UNAM (Autonomous University of Mexico), DISPAV-5. In this software was analyzed the modulus values for pavement structures capable of withstanding low, medium and high traffic intensities. In addition to determining the cost-effectiveness of the different mixtures, obtaining the results that demonstrate the importance of having aggregates asphalts of good quality because they impact directly on the quality of a pavement and as well as costs and fatigue life. Finally, the use of modified asphalt only increases the initial cost by one percent, which makes it clear that the use of modified asphalts not only increases the fatigue life but also saves maintenance and repair costs on the structure.

1. Introducción

México actualmente presenta un sistema carretero en desarrollo y con una gran ambición por parte del gobierno federal de contar con gran cobertura, a la par de estas premisas también toma una gran importancia la implementación de nuevas técnicas y procedimientos que mejoren la competitividad, eficiencia de la calidad de la economía e infraestructura referente a las carreteras. Es por esto que los pavimentos y en especial el diseño de estructuras de pavimento flexible deben tomar la importancia necesaria, así como el correcto uso de las herramientas y equipos destinados para este fin.

En los últimos años las técnicas de pavimentación han experimentado nuevos desarrollos en el uso de maquinaria más sofisticada, así como de productos que modifican el desempeño y las dimensiones de una estructura de un pavimento. Aunado a esto, las condiciones en las que se desempeñan los pavimentos cada día cuentan con condiciones que impactan directamente en el desempeño y en el estado físico del mismo.

Así, durante mucho tiempo en México se usaron los métodos de diseño de pavimentos desarrollados por la AASHTO, por la Universidad Autónoma de México (UNAM) y el del catálogo técnico de secciones de España, siendo el de la UNAM el único método para las condiciones imperantes en la República Mexicana. Sin embargo, es importante analizar secciones de pavimentos con los materiales que comúnmente se usan en México, principalmente con la capa de rodadura siendo esta la que brinda el servicio final al usuario y así tener una idea clara de cómo impacta en los costos, en su desempeño y principalmente en el diseño de estructuras de pavimento flexible.

En este trabajo se presentan varios análisis de estructuras de pavimento diseñadas para condiciones de tráfico con intensidades bajas, medianas y altas, es decir estructuras que van desde secciones con capas de rodadura delgadas hasta secciones con capas de rodadura robustas, y con materiales asfálticos y agregados pétreos de diferentes calidades, analizando su costo final, su impacto en el desempeño y vida, a deformación y fatiga con el uso de materiales asfálticos de diferentes características.

2. Metodología

En este trabajo se hace el uso de varias metodologías para un análisis más completo del costo beneficio sobre el uso de asfaltos modificados y agregados de buena calidad. Inicialmente para el asfalto se usó la clasificación jnr MSCR (Multi-Stress Creep Recovery o creep repetido multi esfuerzo), y grado de desempeño PG, con el objeto de analizar los diferentes asfaltos bajo las metodologías de mayor uso en el mundo y las que ofrecen un análisis más completo para los tipos de asfaltos usados en Latinoamérica y México. Respecto al agregado y diseño de la mezcla se utilizó el protocolo AMAAC (metodología mexicana) con el propósito de observar, analizar el diseño volumétrico y propiedades de desempeño que pueda llegar a obtener la mezcla asfáltica con el uso de este método. Por otra parte se analizaron los valores obtenidos de módulo dinámico y pruebas de fatiga, parámetros relacionados con los conceptos empírico-mecanicistas y que forman parte del protocolo AMAAC en el nivel III y IV, niveles para más de 30 millones de ejes equivalentes. Después de analizar los valores se definió una correlación no numérica entre los valores de módulo, los parámetros de jnr y calidad de los materiales usados en la mezcla. Además se analizó el desempeño de dichos valores de módulo en el DISPAV-5, software más utilizado por la ingeniería mexicana en el diseño de

espesores de pavimento. El programa utiliza la información de tránsito del proyecto y las características de los materiales de cada una de las capas que conforman la estructura. Una vez concluida la entrada de información, el programa calcula los espesores requeridos para evitar la falla por deformación de las capas no estabilizadas con asfalto y por fatiga de las capas asfálticas. Adicionalmente, permite revisar el desempeño por fatiga y deformación de secciones estructurales de pavimentos flexibles a partir de información de tránsito, geometría y características de materiales. El método comprende los dos modelos mecanicistas establecidos en el informe 325: deformación permanente y fatiga. En lo que se refiere a fatiga de las capas asfálticas se considera la investigación internacional así como la realizada en el Instituto, de 1985 a la fecha, en la cual se basan las ecuaciones de fatiga. Para el cálculo de fatiga, los esfuerzos y deformaciones unitarias se estiman con el programa CHEV5, que es una modificación del II del programa CHEV4, desarrollado por la compañía petrolera CHEVRON. El CHEV4 fue proporcionado al II en 1977 por el NITRR de Sudáfrica. Finalmente se hizo un análisis económico en el que solamente se incluyeron costos de los materiales y se definió el beneficio de los usos de asfalto modificado así como su impacto positivo en el desempeño de la mezcla y estructura del pavimento.

3. Resultados y discusiones

3.1 Caracterización del asfalto

Se utilizaron tres diferentes asfaltos que se clasifican con grados PG 64 y 76 según la clasificación SUPERPAVE:

1. Ekbé (asfalto virgen) procedente de la Refinería de Salamanca Guanajuato (PG 64).
2. Ekbé Salamanca endurecido con ácido Polifosfórico (APP=ácido polifosfórico) (PG- 76).
3. Ekbé Salamanca + Polímero RET y ácido polifosfórico como catalizador (PG-76).

El asfalto ekbé Salamanca (asfalto convencional) analizado con el objeto de contar con un asfalto base sin modificar, es decir un asfalto con las características originales procedente de la refinería de Salamanca siendo esta de las más representativas para México. En el caso del asfalto endurecido se empleó en este proyecto para comparar un asfalto que es modificado con ácido polifosfórico usualmente para lograr un grado de desempeño PG superior, sin embargo, es un asfalto que difícilmente cumple con las especificaciones para Jnr como es un tránsito alto y extremo, además que en México la probabilidad de vender un asfalto endurecido es alta y se refleja en resultados desfavorables en los pavimentos. Por último el asfalto modificado con polímero RET se

utilizó para compararlo con los demás asfaltos y garantizar un mejor desempeño en todos los parámetros a utilizar en este trabajo, como son: grado de desempeño y Jnr.

Para esto se realizó un análisis empírico además de su determinación de grado PG a todas las muestras, las cuales se incluyen en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Análisis empírico a los diferentes asfaltos y la determinación del grado de desempeño

Prueba	Ekbé	Ekbé + APP	Ekbé + APP+ polímero RET
Penetración a 25° C (1/10 mm)	51	45	43
Penetración a 4° C (1/100 mm)	28	25	26
Reblandecimiento (°C)	50	58	63
Rec. Elástica por Torsión 25° C (%)	6	12	53
Resiliencia a 25° C (%)	2	20	22
Viscosidad Rotacional 135° C (cP)	462	903	1900
Pérdida de masa por calentamiento (%)	1,67	1,57	1,45
Penetración a 25° C (1/10 mm)	15	15	20
Penetración a 4° C (1/100 mm)	20	14	10
Rec. Elástica por ductilómetro 25° C (%)	4	8	63
Viscosidad Rotacional 135° C (cP)	962	2288	5171
Punto de Inflamación Cleveland °C	>260	297	384
Viscosidad rotacional a 135° C SC4-27 12 rpm (cP)	462	903	1900
Análisis al asfalto original			
Módulo Reológico de corte dinámico a 76°C [G*/sen δ] (KPa)	1,513 (64° C)	1,302	1619
Ángulo de fase (δ) a 76 °C (°)	84,23 (64° C)	78,50	63,76
Análisis del residuo de la película de la prueba de envejecimiento a presión PAV ASTM D 6521			
Módulo reológico de corte dinámico a 34° C [G*sen δ] (KPa)	3625 (28°C)	1958	1691
Rigidez en Creep a -6°C, 60s S (t), (MPa)	96,195	95,81	140651
Valor m(t) a -6°C, 60s,	0,335	0,330	0,307
Grado	PG 64-16	PG 76-16	PG 76-16

Los resultados del análisis empírico demuestran las diferencias existentes entre los diferentes asfaltos analizados, principalmente en las recuperaciones elásticas por torsión y ductilómetro. El asfalto modificado con polímero RET presenta una recuperación elástica alta a diferencia del asfalto convencional y asfalto endurecido que presentan recuperaciones elásticas bajas. Sin embargo, en pruebas como el punto de reblandecimiento presentan valores relativamente cercanos. Otra diferencia notable se presenta en la viscosidad rotacional, los valores más altos representan una mayor resistencia al flujo, siendo este un factor importante en la resistencia ante el fenómeno de deformación permanente. Se determinó el grado de desempeño empleando el método SHRP-SUPERPAVE de acuerdo a la metodología AASHTO TP-5. La caracterización por grado PG demuestra las diferencias que pueden llegar a existir entre asfaltos modificados con distintos polímeros, aun entre un mismo grado de desempeño, además una de las diferencias más importantes es el ángulo de fase. El asfalto modificado con polímero RET presenta el ángulo de fase más bajo, es decir, presenta un comportamiento más elástico que los demás asfaltos, mayor resistencia a la deformación y mayor capacidad de recuperar las deformaciones. De igual forma el asfalto modificado con el polímero presenta la viscosidad más alta y representa por lo tanto mayor resistencia al flujo. Posteriormente se realizó la prueba bajo la especificación para Jnr para dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) así como su deformación máxima acumulada, determinando su valor de Jnr y por lo tanto el nivel de tráfico que será capaz de resistir la mezcla.

Los resultados de Jnr tienen una correlación directa con la deformación acumulada, por lo que a valores mínimos de Jnr menor es la deformación acumulada [8]. El asfalto modificado con Polímero RET resulta con los valores más bajos de Jnr y al incrementar el esfuerzo de 100 a 3200 no hay un efecto negativo en este parámetro, es decir, este asfalto tiene una gran capacidad de almacenar energía para recuperar las deformaciones y una estructura muy estable. Por otra parte, el asfalto endurecido tiene un buen comportamiento para Jnr y un aumento regular con el esfuerzo mayor (3200 Pa), aunque la respuesta elástica tiene una caída importante.

El nivel de tráfico para el cual el asfalto está preparado para desempeñarse de forma correcta se realizó para los tres asfaltos en estudio, los niveles de tráfico se establecen mediante el valor de Jnr que van para un tráfico estándar "S" con un valor de 2 a 4, apto para un tránsito menor a 3 millones de ejes equivalentes de 8,2 ton. Posteriormente, valores de 1 a 2 para un nivel de tráfico pesado "H", para un tránsito de 3 a 10 millones de ejes equivalentes. Un nivel "muy pesado" de "V" entre 0.5 y 1 y finalmente para niveles Extremos "E" valores menores a 0.5.

Como se observa en la **Tabla 2**, al modificar un asfalto convencional las propiedades que se pueden llegar a alcanzar a favor de una mejor calidad del mismo son muchas. Sin embargo, la prueba de desempeño del asfalto Grado PG puede resultar limitada para diferenciar algunos asfaltos modificados y su capacidad de almacenar energía para recuperar las deformaciones, además de las propiedades visco elásticas del mismo, que a diferencia del parámetro Jnr este nos arroja información importante y más precisa de la capacidad de desempeño de cada asfalto bajo la acción del tráfico. En la **Tabla 2** es evidente la diferencia que puede llegar a existir entre dos asfaltos clasificados mediante PG con la misma nomenclatura de 72 -22, pero con una capacidad de desempeño de más de 30 ESAI's para un asfalto modificado con polímero RET, mientras que para el asfalto endurecido apenas una capacidad de 3 a 10 ESAI's.

Tabla 2. Respuesta elástica en creep repetido, a 100 y 3200 Pa, Valores de Jnr y niveles de tráfico para los que el asfalto será capaz de soportar.

Tipo de asfalto	Temp. De prueba	% er a 100 Pa	% er a 3200 Pa	Rdif (100Pa-3200 Pa)
Ekbé Salamanca	64 °C	9	8	1
Ekbé Salamanca + PPA	76 °C	37	7	30
Ekbé Salamanca + polímero RET	76 °C	75	72	3
Tipo de asfalto	Jnr 3200	Grado	Intensidad de tráfico (ESAI's)	
Ekbé Salamanca	1,001	PG 64-22 H	>3 < 10 millones	
Ekbé Salamanca + PPA	1,053	PG 76-22 H	>3 < 10 millones	
Ekbé Salamanca + polímero RET	0,237	PG 76-22 E	>30 millones	

3.2 Caracterización del agregado y diseño de las mezclas

Recientemente fue creado por especialistas, usuarios y empresarios del asfalto en México una metodología llamada protocolo AAMAC PA-MA 01/2013 [11] en el cual se describe el procedimiento necesario para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras y por medio de este garantizar obtener altos niveles de desempeño. Ésta metodología se está empleando como normativa para el desarrollo de diferentes proyectos carreteros en México y por lo tanto servirá para el desarrollo del presente trabajo, abarcando hasta el nivel IV que se recomienda para tránsitos altos (mayores de 30 000 000 de ejes equivalentes de 8,2 toneladas) principalmente para carreteras federales y autopistas de cuota. Analizando dos parámetros muy importantes para este procedimiento como son módulos dinámico y leyes de fatiga.

Se tomó la decisión de analizar dos agregados representativos para México como son la Andesita y el Basalto, los cuales fueron tomados de dos bancos de materiales ubicados en la Ciudad de Morelia Michoacán y Tonalá Jalisco, respectivamente. La caracterización básica correspondiente al primer nivel del Protocolo. Esto se realizó con la intención de conocer las propiedades básicas de los agregados, por lo tanto los resultados se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Caracterización del agregado

Prueba	Resultados		Normativa
	Basalto	Andesita	
Grava			
Partículas alargadas	1.60%	5.62%	15% máx.
Partículas Lajeadas	0.34%	1.77%	15% máx.
Densidad	2.66	2.62	N/A
Desgaste de los Ángeles	10%	17%	
Absorción	1.28	2.37	N/A
Arena			
Equivalente de arena	70	46	50 min.
Densidad	2.6	2.53	N/A
Absorción	2.04	3.39	N/A
Azul de metileno	11 ml/g	36 ml/g	15 ml/g máx.
Angularidad	40.72	36	40 min.

Con el objetivo de contar con el menor número de variables entre los dos agregados y que las condiciones de comparación de propiedades como mezcla fueran lo más parecidas posibles se adoptó una granulometría para ambos agregados, la cual se muestra en la curva granulométrica de la **Figura 1**.

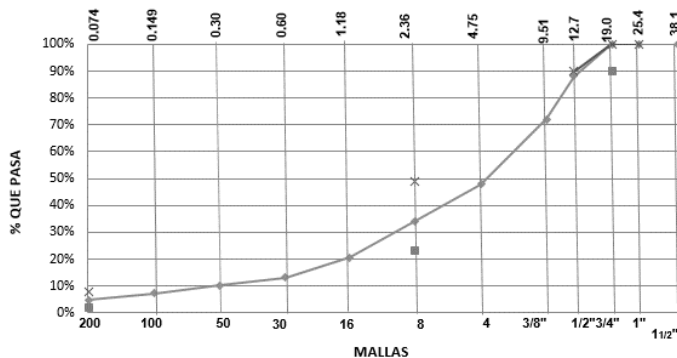


Figura 1. Curva granulométrica adoptada para el proyecto, en la que se representa, en el eje de las ordenadas el número de malla y en las abscisas el porcentaje de material retenido, además de los límites granulométricos

El diseño de la mezcla asfáltica densa se realizó de acuerdo a los parámetros establecidos por el protocolo "Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño" PA-MA-001/2013 [11] y cuenta con las características descritas en la **Tabla 4**. La intención con la que se diseñaron las mezclas era de tener la menor cantidad de variables entre ellas, por lo tanto se decidió que el contenido de vacíos fuera ligeramente diferente con el propósito de que el porcentaje de asfalto efectivo fuese igual y que de esta manera el asfalto contenido trabajase bajo las mismas condiciones en la mezcla compactada.

Tabla 4. Características principales de la mezcla compactada

Característica volumétrica	Material	
	Basalto Guadalajara	Andesita Morelia
Porcentaje de vacíos de la mezcla (%)	4.60	3.85
Porcentaje de asfalto efectivo (%)	6.15	6.15
Contenido óptimo de asfalto (%)	6.2	6.2

3.3 Valores de módulo dinámico

Una vez determinada la fórmula de trabajo se procedió a la elaboración de especímenes cilíndricos de 15 cm de altura y 10 cm de ancho compactados en el compactador giratorio de SUPERPAVE con un número de giros igual a 125, mezclándose a una temperatura de 165°C y una compactación a 155°C, los especímenes se corrieron por triplicado y se promediaron para el análisis del módulo dinámico por lo que se obtuvieron las siguientes combinaciones:

- Ekbé Salamanca+ Andesita y Ekbé Salamanca + Basalto.
- Ekbé Salamanca + APP + Andesita y Ekbé Salamanca + APP + Basalto.
- Ekbé Salamanca + polímero RET + Ácido Polifosfórico (catalizador) + Andesita y Ekbé Salamanca + polímero RET + Ácido Polifosfórico (catalizador) + Basalto.

Para el módulo dinámico se ensayaron los especímenes en la prensa dinámica de acuerdo a la norma ASTM D 3497 usando las frecuencias de 10, 5, 1.0, 0.5, y 0.1 Hertz a una temperatura de 20°C con dos horas de acondicionamiento previas al ensaye obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5. Resultados del módulo dinámico en Mega Pascales (MPa) aplicado con frecuencias de 10 a 0.1 Hertz a probetas con una composición de Ekbé y asfaltos modificados, con agregados de tipo andesita y basalto de la ciudad de Morelia y Guadalajara respectivamente.

Tipo de mezcla (componentes)	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
Andesita					
Ekbé Salamanca	8725	7707	4778	3856	2162
Ekbé Salamanca + Acido Polifosfórico	10030	8447	4931	3941	2167
Ekbé Salamanca + Polímero RET	10101	8786	5276	4261	2193
Basalto					
Ekbé Salamanca	10707	7727	4796	3926	2409
Ekbé Salamanca + Acido Polifosfórico	11211	9695	6150	4999	3224
Ekbé Salamanca + Polímero RET	12040	10071	6303	5389	2342

En el análisis de modulo Dinámico a las probetas compuestas principalmente con andesita se observa la tendencia de la disminución del valor de módulo a medida que la frecuencia va disminuyendo, así para una frecuencia alta de 10 Hz que simula un tráfico a altas velocidades, el valor es superior a los 10, 000 MPa para el caso del asfalto modificado y endurecido, mientras que para la frecuencia con mayor amplitud de carga (0.1 Hz), los valores se comportan de una manera similar para los tres tipos de mezclas, valores ligeramente por arriba de los 2, 000 MPa.

Para los módulos dinámicos compuestos por agregado basáltico los resultados son más favorables en comparación con la andesita por lo que se ve reflejado la importancia de contar con agregados de buena calidad. Así, para una frecuencia de 10 Hz los valores obtenidos son superiores a los 10, 000 Mega Pascales. Mientras que para la mezcla compuesta por Ekbé Salamanca, polímero RET y ácido polifosfórico la susceptibilidad a las deformaciones con el cambio de velocidad de aplicación de carga es menor. Los resultados a frecuencias bajas son muy similares por lo que indica el daño que realizan las cargas a bajas velocidades sobre el pavimento, comunmente presentados en reductores de velocidad, cruceros y vialidades con tránsito lento.

En la figura siguiente se observan las diferencias bien marcadas para las diferentes frecuencias en la que además se define a la frecuencia más baja como la más crítica para un pavimento. Entonces, es importante analizar las cargas a baja velocidad ya que en estos rangos de velocidad (velocidades bajas) se produce el mayor daño al pavimento, además se observa para las mezclas

que cumplen con los parámetros de caracterización que son las que muestran un mejor desempeño resultando en materiales con menos plasticidad y por ende, con menor relación esfuerzo-deformación.

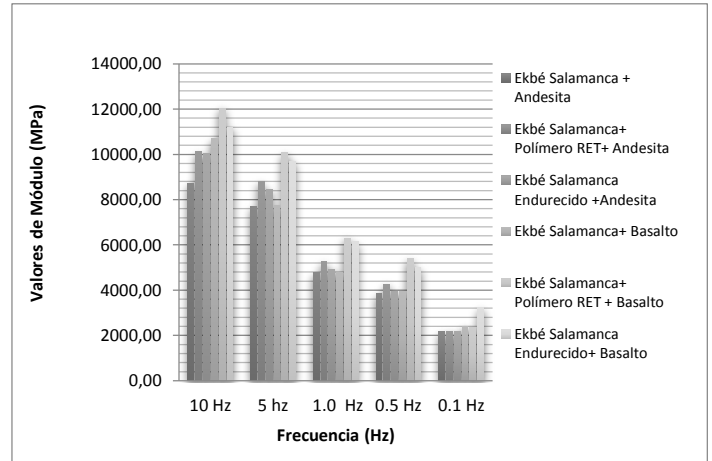


Figura 2. Gráfica general de los módulos dinámicos a frecuencias de 10 a 0.1 Hertz (de izquierda a derecha), los valores más altos para todas las frecuencias son los compuestos con basalto, asfalto modificado con polímero RET y el asfalto endurecido.

3.4 Prueba a fatiga de mezclas asfálticas

La prueba a fatiga se ha obtenido a partir de un ensayo de tracción indirecta. Esta se realizó bajo deformación controlada (μ -strain o micro-deformaciones) con micro-deformaciones de 750, 650 y 550 a una temperatura constante de 20°C con 120 minutos previos de acondicionamiento. En total se obtuvieron seis tipos de mezcla con tres pruebas de fatiga para cada una. Por otra parte, el criterio de falla se determinó cuando la probeta perdió el 50% de su módulo de rigidez inicial (criterio clásico).

Para las pruebas de fatiga de las mezclas asfálticas con agregado andesita es notable la diferencia para cada tipo de asfalto como componente que influye directamente en el comportamiento de la mezcla. Se observa en la **Figura 3** que el asfalto modificado con polímero RET es quien presenta un mayor número de repeticiones de carga para todos los casos y en el que la diferencia es pronunciada con respecto a las otras mezclas compuestas por asfalto endurecido y asfalto convencional. Es decir, resultará en una vida en número de ejes equivalentes o vida de proyecto mayor que las demás mezclas. Además, a diferencia de las pruebas de modulo dinámico la diferencia entre el asfalto endurecido y el asfalto modificado es notable. Se observa una mejora de más de 4 veces el número de repeticiones entre el asfalto modificado con Polímero RET y un asfalto convencional, esto para las microdeformaciones de 750 a 550 μ -strain.

En segundo término se realizaron las pruebas de fatiga de las mezclas asfálticas con agregado basáltico en las que de igual manera se realizaron bajo una temperatura de 20°C a 750, 650 y 550 micro-deformaciones y dos horas previas de acondicionamiento bajo la temperatura de prueba. Para las leyes de fatiga con basalto, el tipo de asfalto se refleja en los resultados en el que se observa una clara diferencia para la mezcla con asfalto modificado. Además, el número de repeticiones sobrepasa los 400 000 ciclos de repetición de carga por lo que se reflejará en un pavimento más durable que tendrá una vida a fatiga mucho más prolongada que los demás tipos de asfalto.

A continuación en la **Figura 3** se comparan todas las mezclas en la que se grafica el número de repeticiones de carga para cada micro-deformación (μ -strain) y tipo de mezcla.

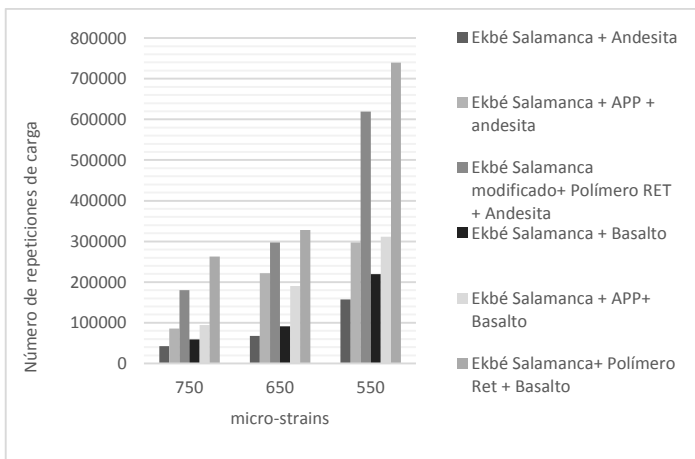


Figura 3. Número de repeticiones de carga para cada tipo de mezcla y micro-deformación.

En esta grafica se observa el aumento de repeticiones de carga con el uso de asfaltos modificados casi 7 veces comparando una mezcla compuesta por agregados de mala calidad y un asfalto convencional, entre una mezcla compuesta por agregados de buena calidad y un asfalto modificado con Terpolímero RET. Mientras que comparando las mezclas que cuentan con agregados de buena calidad con el uso de asfalto modificados entre ellas aumenta el número de repeticiones hasta en un 300%. Por lo que es evidente el aporte del asfalto modificado en este parámetro de vida a fatiga.

Además es importante mencionar la importancia de tener agregados y asfaltos que cumplan con todos los estándares establecidos para dicho elemento ya que el número de repeticiones de carga se puede elevar a 6 veces en comparación de un asfalto convencional de acuerdo a este trabajo.

3.5 Análisis de vida útil y costo de secciones de pavimento empleando los valores de módulo y leyes de fatiga obtenidos

La obtención de módulos dinámicos y leyes de fatiga ha sido un tema con poco desarrollo dentro de la ingeniería mexicana. Sin embargo, en este trabajo de investigación se obtuvieron varios resultados con dos agregados típicos de México (basalto y andesita), para lo cual se analizaran dentro de un par de secciones de pavimento para intensidades de tráfico pesado y ligero, en las que los espesores son definidos de acuerdo al catálogo español (MOPU, 1989) [13]. Los módulos dinámicos obtenidos en este trabajo fueron introducidos para la capa asfáltica dentro de la sección de pavimento, ensayados a una frecuencia de 10 Hz, la cual simula una velocidad de aplicación de carga de un vehículo circulando a 70 km/h aproximadamente. Por otra parte, los valores de VRS (Valor relativo de Soporte), fueron tomados de las recomendaciones de la “Publicación técnica No. 104” del Instituto Mexicano del Transporte [6]. En este apartado analizaremos dos secciones de pavimento obtenidas a partir del catálogo español en el que se tienen 4 capas de arriba hacia abajo: carpeta asfáltica, base, subrasante y terraplén. Además se obtendrán sus dimensiones y características básicas. Las razones por las que fueron tomadas las secciones del catálogo español son fines prácticos, y es porque es una metodología que presenta esta selección de secciones de pavimento para intensidades de tráfico alto y baja de manera sencilla y rápida. Los espesores y características para cada tipo de capa son presentados a continuación:

Tabla 6. Capas adoptadas para el proyecto y sus características básicas y espesores en centímetros para las secciones adoptadas. Los valores de VRS son los máximos permitidos por la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Nombre de la capa	Espesores (cm)			Valor máximo de VRS (SCT)	
	*Sección 121	*Sección 4221	*Sección 3221		
Carpeta asfáltica	30	5	15	(N/A)	(N/A)
Base	25	25	35	100	120
Sub rasante	35	35	35	20	20
Terraplén	200	200	200	5	20

*Sección 121: sección para más de 30 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

*Sección 4221: sección para menos de 5 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

*Sección 3221: sección para 10-20 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

Estas características serán con las que se analizará para obtener el tipo de explanada en el catálogo español. Por lo que el tipo de explanada adoptado para las dos intensidades será “tipo E2” y de acuerdo al valor de VRS igual a 20 se procede a elegir el tipo de material que para este caso corresponde a un suelo seleccionado

(3). Los tipos de secciones adoptadas son “T1” y “T42” para una intensidad de tráfico alta y baja respectivamente para la base y capa asfáltica. Por lo que las secciones de pavimento quedan conformadas como se expresan en la **Tabla 6**. Bajo estas dimensiones serán analizadas ambas secciones con el software DISPAV-5 con el objetivo de analizar los diferentes módulos obtenidos bajo una frecuencia de 10 Hz para todas las combinaciones de mezclas asfálticas obtenidas en este trabajo de investigación. Además, de obtener los esfuerzos obtenidos en las capas inferiores y la vida a fatiga.

3.6 Análisis de desempeño de secciones de pavimento en DISPAV-5

El procedimiento se realizó en el software DISPAV-5 desarrollado por la UNAM, el cual permite el cálculo de la vida previsible por deformación y por fatiga de pavimentos previamente establecidos. El procedimiento consiste en: Elección del tipo de carretera: para este caso, se seleccionó una carretera de altas especificaciones. Las capas consideradas y los espesores: Los espesores y capas seleccionadas se especifican en la **Tabla 6**. Nivel de confianza del proyecto: en cuanto al nivel de confianza se propuso un 85% al ser sugerido por el manual y que además se considera adecuado para el proyecto.

Tabla 7. Vida a fatiga para las estructuras de pavimento flexible con diferentes valores de módulo dinámico de la carpeta asfáltica, para este caso el análisis se hizo para la carpeta asfáltica por fatiga y las capas granulares para deformación.

Tipo de capa	Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 8725 MPa (Ekbé Salamanca)		
	Deformación o fatiga sección 4221	Deformación o fatiga sección 3221	Deformación o fatiga sección 121
	Andesita		
Carpeta asfáltica	4.7	32.8	>150
Base	6.1	>150	>150
Sub rasante	1	58.3	>150
Terraplén	0.2	3.2	>150
Basalto			
Carpeta asfáltica	6.5	55	>150
Base	8.5	>150	>150
Sub rasante	1.2	84.1	>150
Terraplén	0.3	4	>150

Tipo de capa	Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 10030 MPa (Ekbé+ APP)		
	Deformación o fatiga sección 4221	Deformación o fatiga sección 3221	Deformación o fatiga sección 121
	Andesita		
Carpeta asfáltica	5.8	46.6	>150
Base	7.6	>150	>150
Sub rasante	1.1	74.7	>150
Terraplén	0.3	3.7	>150
Basalto			
Carpeta asfáltica	7	62	>150
Base	9.2	>150	>150
Sub rasante	1.3	91.5	>150
Terraplén	0.3	4.3	>150
Tipo de capa	Vida previsible para módulo dinámico a 10 Hz= 10101 MPa (Ekbé + polímero RET)		
	Deformación o fatiga sección 4221	Deformación o fatiga sección 3221	Deformación o fatiga sección 121
	Andesita		
Carpeta asfáltica	5.9	47.4	>150
Base	7.7	>150	>150
Sub rasante	1.1	75.7	>150
Terraplén	0.3	3.8	>150
Basalto			
Carpeta asfáltica	8	74.8	>150
Base	10.5	>150	>150
Sub rasante	1.4	104.4	>150
Terraplén	0.3	4.7	>150

Como se observa en la **Tabla 7** el DISPAV-5 no presenta sensibilidad para estructuras con espesores de carpeta que sobrepasan los 30 cm de espesor, además de que los diferentes módulos de las carpetas asfálticas no se ven reflejadas en la vida a deformación y por fatiga ya que solo presenta un resultado mayor a 150 millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas (observar columnas en orden de izquierda a derecha 4, 7 y 10).

Los resultados son similares para ambos materiales. Sin embargo, las diferencias debieran reflejarse en las vidas a fatiga en las que las mezclas con mayor módulo presentarían mayores horizontes de vida.

Para la “sección 3221” del catálogo español que es una sección más esbelta en comparación con la “121” se obtuvieron resultados muy interesantes principalmente para la mezcla con basalto que presenta una vida útil mayor a la andesita (**Tabla 7**). Comparando la mezcla de basalto con asfalto modificado con la mezcla de Ekbé con andesita se obtiene una vida a fatiga de más del doble de vida útil (2.28 veces más). Además, comparando asfaltos modificados pero con agregados diferentes, en este caso el basalto (pétreo con mejores propiedades que la andesita), sobrepasa la vida a fatiga en un 37% por lo que de acuerdo a estos resultados en estructuras con espesores más robustos la vida a fatiga tiende a ser más larga y depende de manera más directa de la calidad de los agregados y del asfalto.

Para un diseño en el DISPAV-5 con una estructura de pavimento con espesores más esbeltos, primeramente se observa una importante diferencia entre los resultados para ambos tipos de agregado en el que el agregado con mejores características presenta en general mejores resultados en la vida a fatiga y deformación. Con respecto a los valores de módulo de las diferentes mezclas, se observa que el asfalto modificado aumenta hasta en un 25% la vida a fatiga con respecto al asfalto convencional y un 14% con respecto al asfalto endurecido para el caso del basalto. Por otra parte, el efecto del polímero RET aumenta la vida a fatiga entre un material pétreo a otro un 35%, evidenciando la importancia de contar con un asfalto y agregado de buena calidad en la mezcla. Además, el DISPAV-5 refleja datos con menor diferencia entre secciones de las mismas dimensiones pero con módulos de rigidez de carpeta diferentes.

3.7 Análisis de costos de las secciones de pavimentos adoptadas.

El objetivo de este apartado es conocer el impacto económico de cada una de las capas dentro de la estructura del pavimento, en especial el costo del agregado y asfalto en la capa de rodadura por lo que algunas inversiones pequeñas podrían resultar en pavimentos de mejor calidad. En este apartado se analizaron los costos de las secciones adoptadas para el análisis de vida útil a fatiga. Para esto, se propuso un ejemplo de una obra de una carretera de un kilómetro de longitud con 10 metros de corona (3.5 m por carril y 1.5 m de acotamiento, por sentido de circulación), para la cual se analizan 3 secciones de pavimentos (sección del catálogo español: 121, 4221 y 3221). Además se supondrá una distancia de acarreo del banco de materiales a la obra de 5000 metros.

Se observa que en todas las estructuras el costo de las capas granulares sobrepasa el 95% del total del costo del pavimento. Sin embargo, de acuerdo a lo analizado en temas anteriores de este trabajo quien tiene un mayor aporte estructural es la mezcla asfáltica, por lo que las diferencias entre la modificación y no modificación del asfalto resulta trascendental. El incremento de costo entre un asfalto convencional y un asfalto modificado para este tipo de estructura apenas alcanza el 5.5 por ciento del costo total de la mezcla asfáltica, mientras que en el costo total del pavimento apenas alcanza el 1%.

Tabla 8. Análisis de costo de las secciones de pavimento adoptadas para el análisis a vida por fatiga y deformación en la que se visualiza el impacto económico que genera el uso de asfaltos modificados y su pequeño impacto en el costo total de la obra para cada sección de pavimento. Los análisis para este caso están en dólares estadounidenses (USD)

Sección 4221			
Basalto +			
Concepto	Ekbé Salamanca	Ekbé + APP	Basalto+ Ekbé + Polímero RET
Mezcla Asfáltica	\$2,877	\$2,930	\$3,042
Base	\$617,103	\$617,103	\$617,103
Subrasante	\$751,075	\$751,075	\$751,075
Terraplén	\$3,638,810	\$3,638,810	\$3,638,810
Costo Total	\$5,009,865	\$5,009,918	\$5,010,030
Andesita+			
Concepto	Ekbé Salamanca	Ekbé + APP	Ekbé + Polímero RET
Mezcla Asfáltica	\$2,862	\$2,915	\$3,027
Base	\$584,795	\$584,795	\$584,795
Subrasante	\$727,206	\$727,206	\$727,206
Terraplén	\$3,375,756	\$3,375,756	\$3,375,756
Costo Total	\$4,690,619	\$4,690,672	\$4,690,784
Sección 121			
Basalto +			
Concepto	Ekbé Salamanca	Ekbé + APP	Ekbé + Polímero RET
Mezcla Asfáltica	\$7,833,087	\$7,978,861	\$8,282,557
Base	\$617,103	\$617,103	\$617,103
Subrasante	\$751,075	\$751,075	\$751,075
Terraplén	\$3,638,810	\$3,638,810	\$3,638,810
Costo Total	\$12,840,075	\$12,985,849	\$13,289,545

Andesita +			
Concepto	Ekbé Salamanca	Ekbé + APP	Ekbé + Polímero RET
Mezcla Asfáltica	\$7,793,115	\$7,938,890	\$8,242,586
Base	\$584,795	\$584,795	\$584,795
Subrasante	\$727,206	\$727,206	\$727,206
Terraplén	\$3,375,756	\$3,375,756	\$3,375,756
Costo Total	\$12,480,872	\$12,626,646	\$12,930,342

Lo más importante y destacado de este análisis es que incrementando el costo total inicial de la obra (apenas el 1%), en la modificación de asfalto se puede llegar a aumentar la vida útil, o hasta en un 23% de la vida útil inicial (1/4 de vida más). Mientras que comparando una mezcla compuesta con un agregado que cumple con los parámetros requeridos y usando en esa mezcla un asfalto modificado el comportamiento comparado al de una mezcla con agregados de mala calidad y asfalto convencional la vida de un pavimento se puede llegar a aumentar hasta el doble con el simple hecho de usar componentes de buena calidad. Es por eso que resulta más que adecuado el utilizar asfaltos modificados en este tipo de estructuras. Para la sección 121, en la que se tienen espesores de pavimento más robustos de carpeta asfáltica y en la que por consecuencia los costos se elevan. Cabe mencionar que para esta sección el DISPAV-5 no pudo obtener resultados de vida a fatiga por lo que no se tiene una referencia exacta de cuanto puede afectar en una mejor vida a fatiga. Sin embargo se tiene como referencia la sección 3221 la cual cuenta con una sección más robusta que la sección 4221 del catálogo español y que cuenta con resultados muy interesantes. Ya que para una sección con los mismos tipos de materiales pero con el uso de asfaltos modificados en comparación con un asfalto convencional la vida útil se incrementa hasta el 40% lo que hace suponer que para secciones más robustas los resultados en el DISPAV-5 de la vida útil comparando asfaltos modificados y convencionales tendería a crecer a favor de los asfaltos modificados. Es así como en este capítulo analizamos las vidas a fatiga y la importancia del uso de asfaltos modificados en la actualidad tomando en cuenta el bajo costo de inversión y su gran aportación dentro del desempeño de la estructura del pavimento.

4. Conclusiones

El parámetro "Jnr" presentó una tendencia en los resultados muy similar a los obtenidos en las leyes de fatiga y módulo dinámico. A pesar de ser una prueba propia del asfalto, el panorama que nos ofrece a partir de sus resultados es de mucha utilidad para poder tener una idea de lo que el asfalto puede llegar a soportar.

El módulo de las mezclas asfálticas se ha convertido en un parámetro fundamental en diversos métodos de diseño de pavimentos flexibles, por esta razón forma parte de los requisitos solicitados por el protocolo AMAAC para diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño, que ha sido adoptado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para la mayor parte de sus proyectos de construcción y rehabilitación de pavimentos.

A pesar de todo esto, en México se cuenta con poca experiencia en la medición de Módulos en mezclas asfálticas, razón por la cual se tomó la decisión de realizar esta investigación. Pudimos observar que el ensayo de módulo dinámico a pesar de su mayor duración tiene mayor sensibilidad y muestra claramente la diferencia de la calidad de los agregados empleados así como la calidad del asfalto.

Finalmente se ha comprobado que el uso de asfaltos modificados y un agregado de buena calidad aumentan la vida útil hasta en un doble de vida en comparación a un asfalto convencional y un agregado de mala calidad. Además, el uso de asfaltos modificados solo incrementa el costo inicial en uno por ciento lo que está más que claro que el uso de asfaltos modificados no solo aumenta la vida a fatiga sino que ahorra los costos de mantenimiento y reparación en la estructura.

5. Referencias

- [1] Huang, Y. Pavement Analysis and Design (2a ed.). University of Kentucky: prentice Hall.
- [2] Zarate, M. Diseño de pavimentos flexibles (3a ed.). México D. F: AMAAC.
- [3] McGennis, R. Shuler, S. Bahia, H. (1994). Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE (1a ed.). Lexington KY: Asphalt Institute.
- [4] McGennis, R. Anderson, M. Kennedy, T. Solaimanian, M. (1994). Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE (1a ed.). Lexington KY: Asphalt Institute.
- [5] Corro, S. Prado, G. (1998). Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. México D. F: instituto de ingeniería de la UNAM.
- [6] Rico, A. Téllez R. Garnica P. (1998). Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodología, de Diseño y Tendencias. Publicación Técnica No. 104 Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.



- [7] Sandoval I., Cremades I., "Determinación del grado de desempeño del asfalto usando como parámetro de especificación la viscosidad a corte cero", IV Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2005.
- [8] Sandoval I. Cremades I., "Caracterización de asfaltos mediante creep repetido multiesfuerzo en reómetro de corte dinámico". V Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2007.
- [9] American association of state highway and transportation officials (AASHTO). T350 "Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)", Washington DC, USA, 2014.
- [10] Federal highway administration (FHWA-HIF-11-038). "The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure", Office of pavement technology, Abril 2011.
- [11] PA-MA 01 (2013³). diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño (AMAAC).
- [12] DISPAV-5 (1998). Método de diseño de pavimentos flexibles (UNAM)
- [13] Ministerio de Obras Públicas.- Instrucción 6.1-I.C y 6.2-I.C, Secciones de Firme; Catálogo de Diseño MOPU.- España, 1990.