

IAG391-01-2013
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa ELABORADAS CON
DISTINTOS TIPOS DE AGREGADO Y ASFALTO

Jorge Alarcón Ibarra
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, México
jorge.alarcon.ibarra@hotmail.com

Rey Omar Adame Hernández
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, México
omar.adame.hdez@live.com

Pedro Limón Covarrubias
Lasfalto
Guadalajara, México
pedro@surfex.com.mx

Israel Sandoval Navarro
Lasfalto
Guadalajara, México
Israel@surfex.com.mx

Carlos Chávez Negrete
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, México
cachavez@umich.mx

Eleazar Arreygue Rocha
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, México
arrocha@umich.mx

Resumen

En México, las dependencias de gobierno dedicadas a la gestión y conservación de carreteras como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), han implementado métodos y programas para reducir los costos de operación y mejorar las técnicas de diseño para carreteras. Entre ellos están el método propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el propuesto por la AASHTO en 1993, los cuales requieren de un parámetro fundamental de las mezclas asfálticas conocido como Módulo. Del mismo modo, la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) con el fin de lograr los resultados alcanzados en países desarrollados han creado una metodología de diseño de mezclas asfálticas

que se asocia a las condiciones predominantes en México, dentro del cual existe un parámetro muy importantes en el diseño de las mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño definido como Módulo Dinámico, sin embargo, y a pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años, estos parámetros son inusualmente medidos. Por esta razón, en este trabajo de investigación, se decidió medir el Módulo de mezclas asfálticas densas elaboradas con diferentes asfaltos y agregados. Los asfaltos fueron evaluados mediante la clasificación Jnr (non-recoverable creep compliance) determinando la importancia de los asfaltos modificados, así como su capacidad para soportar diferentes niveles de tráfico. Por otra parte, se determinaron los Módulos Dinámicos a compresión simple y a compresión diametral también conocido como Módulo Resiliente, usando dos agregados representativos para México como la Andesita y el Basalto, encontrando una clara diferencia entre los resultados con cada tipo de agregado, asfalto y condiciones de prueba.

Resumo

O México atualmente se apresenta como um sistema de auto-estrada para o desenvolvimento e com uma grande ambição por parte do governo federal para uma grande cobertura, a qualidade e a segurança e, dessa forma promove a competitividade e a eficiência da economia e dos sectores que compõem este. É por esta razão que o calçamento e, nomeadamente, a sua superfície de rolamento deve estar em perfeito estado porque é a camada mais importante e está em contacto com o utilizador.

No entanto, as vias construídas com os pavimentos flexíveis no México, têm apresentado problemas com processos construtivos gerado pobre, pobre compactação, uso de materiais inadequados e uma rede de corrupção que envolve todos esses fatores que causam e tendo como resultado de má qualidade pavimentação.

No México, há para os engenheiros envolvidos no projeto de pavimentos e, em geral, para os construtores, métodos e manuais para alcançar o bom desempenho de um pavimento. Entre os esforços para melhorar as estradas do México são os métodos, tais como o proposto pelo Instituto de Engenharia da UNAM, e proposto pela American Association of State Highway e Transporte Funcionários (AASHTO). Ela pode ser mais fácil de transferir os resultados de estudos realizados em outros países para o México, mas seria inadequado para as condições prevalecentes em nosso país. Assim, você deve tomar a iniciativa de propor uma metodologia para validar o comportamento e a construção de calçadas adaptadas às condições do México.

É por estas e por outras razões que é necessário prosseguir a investigação e a ser capaz de criar postos de trabalho que as condições reais para o nosso país. Por conseguinte, este trabalho apresenta uma série de dados que nos aproxima da realidade da moldagem os valores (MPA) que deve ser usado no projeto métodos de materiais representante da República do México, são os Andesite e basalto, além de descobrir a relação entre os valores de módulo e o módulo resiliente Dinâmico. Para misturas betuminosas densas, e o efeito de diferentes asfaltos empregados, além de seu comportamento sob o teste de recuperação elástica e creep repetidas (MCSR) e o nível de tráfego para que apresentem um desempenho adequado.

INTRODUCCIÓN

México actualmente presenta un sistema carretero en desarrollo y con una gran ambición por parte del gobierno federal de contar con gran cobertura, calidad y seguridad y de esta manera impulse la competitividad y eficiencia de la economía y los sectores que componen a ésta. Es por

esto que los pavimentos y en especial su superficie de rodamiento deben encontrarse en perfecto estado pues es la capa más importante y que está en contacto con el usuario.

Sin embargo, las vías construidas con pavimentos flexibles en México, han presentado problemas generados con procesos constructivos deficientes, mala compactación, utilización de materiales inadecuados y una red de corrupción que engloba todos estos factores causando y teniendo como resultado pavimentos de mala calidad.

En México existen para los ingenieros dedicados al diseño de pavimentos y en general para los constructores, métodos y manuales para lograr el correcto desempeño de un pavimento. Entre los esfuerzos realizados para mejorar las carreteras mexicanas se encuentran los métodos como el propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, y el propuesto por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Podría resultar fácil transferir los resultados de los estudios realizados en otros países a México, pero serían inadecuados para las condiciones imperantes en nuestro país. Así pues, se debe proponer una metodología que valide el comportamiento y la construcción de pavimentos adaptados a las condiciones de México.

Es por estas y otras razones que es necesario continuar investigando y poder crear trabajos en los que se tengan las condiciones reales para nuestro país. Por lo que en este trabajo se presenta una serie de datos que nos acerca a la realidad de los valores de Módulo (Mpa) que debieran usarse en los métodos de diseño para los materiales representativos de la república mexicana como son la Andesita y Basalto, además de buscar la relación que existe entre los valores de Módulo Dinámico y Módulo Resiliente para mezclas asfálticas densas, y el efecto de los diferentes asfaltos empleados, además de su comportamiento bajo la prueba de recuperación elástica y creep repetido (Mscr) y el nivel de tráfico para el que presentan un desempeño adecuado.

Caracterización del asfalto

Se utilizaron tres diferentes asfaltos que se clasifican con grados PG 64 y 76 según la clasificación SUPERPAVE descrita en la norma mexicana N-CMT-4-05-004 (SCT, 2008):

1. Asfalto AC-20 (asfalto virgen) procedente de la Refinería de Salamanca (PG 64-16).
2. Asfalto AC-20 oxidado (PG- 76-16).
3. Asfalto AC-20 con polímero RET y ácido polifosfórico como catalizador (PG-76-16).

El asfalto AC-20) asfalto virgen se utilizó con el objeto de analizar un asfalto base sin modificar, es decir un asfalto con las características originales al salir de la refinería de Salamanca siendo esta de las más representativas para México. En el caso del asfalto oxidado se adjudicó a este proyecto con el objeto de comparar un asfalto que es modificado con ácido polifosfórico para engañar al grado de desempeño PG en la normativa, sin embargo es un asfalto que no cumple con las especificaciones para Jnr como es un tránsito alto y extremo, además que en México la posibilidad de vender un asfalto oxidado es alta, obteniendo resultados desfavorables en los pavimentos. Y por último el asfalto modificado con polímero RET se utilizó para compararlo con los demás asfalto y garantizar un mejor desempeño en todos los parámetros a utilizar en este trabajo como son grado de desempeño y Jnr.

Se realizó un análisis empírico a todas las muestras las cuales se incluyen en la **tabla 1**.

Tabla 1: Análisis empírico a los diferentes asfaltos

Prueba	AC- 20	AC-20 + APP + Polímero RET	AC-20 Oxidado
Penetración a 25° C (1/10 mm)	51	43	45
Penetración a 4° C (1/100 mm)	28	26	25
Reblandecimiento (°C)	50	63	58
Rec. Elástica por Torsión 25° C (%)	6	53	12
Resiliencia a 25 ° C (%)	2	22	20
Viscosidad Rotacional 135° C (cps)	462	1900	903
Pérdida de masa por calentamiento (%)	1,67	1,45	1,57
Penetración a 25° C (1/10 mm)	15	20	15
Penetración a 4° C (1/100 mm)	20	10	14
Rec. Elástica por ductilometro 25° C (%)	4	63	8
Viscosidad Rotacional 135° C (cps)	962	5171	2288

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 del asfalto oxidado 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 (Sandoval et al, 2005).

Se determinó el grado de desempeño empleando el método SHRP-SUPERPAVE de acuerdo a la metodología AASHTO TP-5 o su homólogo en la Normativa Mexicana M-MMP-4-05-025/02.

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.

Tabla 2: Determinación del Grado PG

Prueba	AC- 20	AC-20 + APP+ Polímero RET	AC-20 Oxidado
Punto de Inflamación Cleveland °C	>260	384	297
Viscosidad rotacional a 135° C SC4-27 12 rpm (cP)	462	1900	903

Análisis al asfalto original			
Módulo Reológico de corte dinámico a 76°C [G*/sen δ] (KPa)	1,513 (64° C)	1,619	1,302
Ángulo de fase (δ) a 76 °C (°)	84,23 (64° C)	63,76	78,50
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)	1691	1958
Rigidez en Creep a -6°C, 60s S (t), (MPa)	96,195	140,651	95,81
Valor m(t) a -6°C, 60s, (adimensional)	0,335	0,307	0,330
Grado	PG 64-16	PG 76-16	PG 76-16

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.

Tabla 3: Recuperación elástica en creep repetido, a 100 y 3200 Pa

Tipo de asfalto	Temp. De prueba	Jnr a 100 Pa	Jnr a 3200 Pa	Jnr _{dif} (100 Pa- 3200 Pa) (%)	% Def. máxima acumulada
AC -20 salamanca	64	0,874	1,001	14,55	3244
AC-20+Polímero RET+ PPA	76	0,253	0,237	0	964
AC-20 oxidado	76	0,645	1,053	63,11	3501

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 (Sandoval et al, 2007). El asfalto modificado con Polímero RET resulta con los valores más bajos de Jnr y al subir el esfuerzo de 100 a 3200 no hay un aumento en este parámetro, es decir que este asfalto tiene una gran capacidad de almacenar energía para recuperar las deformaciones y una estructura muy estable. Por otra parte, el asfalto envejecido tiene un buen comportamiento para Jnr y un aumento regular con el esfuerzo mayor (3200 Pa). El nivel de tráfico para los tres asfaltos analizados se determinó primero el grado PG por temperatura de trabajo, 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” y tránsito de 3 a 10 millones de ejes equivalentes, un nivel “muy pesado” de “V” entre 0.5 y 1 de jnr y finalmente para niveles Extremos “E” valores menores a 0.5.

Tabla 4: Valores de Jnr y niveles de tráfico

Asfalto	Jnr ₃₂₀₀	Grado	Intensidad de tráfico
AC-20 Salamanca	1,001	PG 64-XX H	>3< 10 millones
AC-20 + Polímero + PPA	0,237	PG 76-XX E	>30 millones
AC-20 oxidado	1,053	PG 76- XX H	>3 < 10 millones

Caracterización del agregado

Recientemente fue creado por especialistas, usuarios y empresarios del asfalto en México una metodología llamada Protocolo AAMAC PA-MA 01/2008 en el cual se describe el procedimiento necesario para diseñar una mezclas 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 III que se recomienda para tránsitos altos (entre 10 000 000 y 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 dinámicos y módulos resilientes.

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 se realizó con la intención de conocer las propiedades básicas de los agregados y que se analizan en la tabla 5.

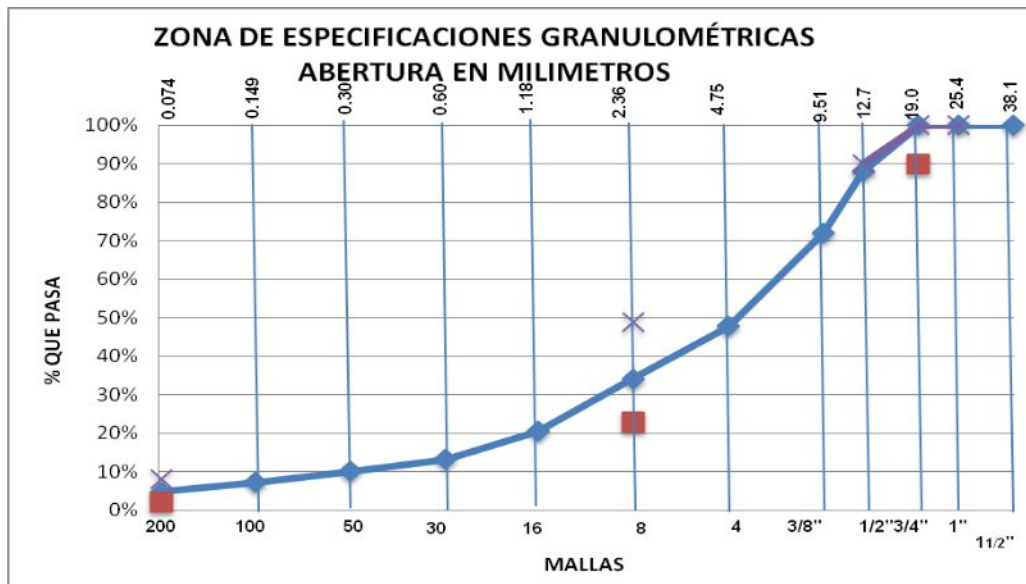
Tabla 5: Caracterización del agregado

Prueba	Resultados		Normativa
	Basalto (Guadalajara)	(Andesita) Morelia	
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 para una mezcla densa 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 ("X" límite superior y cuadro, límite inferior)



Diseño de la mezcla.

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-001/2011** y cuenta con las características descritas en la **tabla 6**. La intención con la que se diseñaron las mezclas era de tener la menor cantidad de diferencias 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 6: 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 optimo de asfalto (%)	6.2	6.2

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

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:

- Asfalto convencional AC-20+ Andesita de Morelia
- Asfalto convencional AC-20+ Basalto de Guadalajara
- Asfalto convencional AC-20 Oxidado + Andesita de Morelia
- Asfalto convencional AC-20 Oxidado+ Basalto de Guadalajara
- Asfalto convencional AC-20+ Ácido Polifosfórico (catalizador)+ polímero RET + Andesita de Morelia
- Asfalto convencional AC-20+ Ácido Polifosfórico (catalizador)+ polímero RET + Basalto de Guadalajara

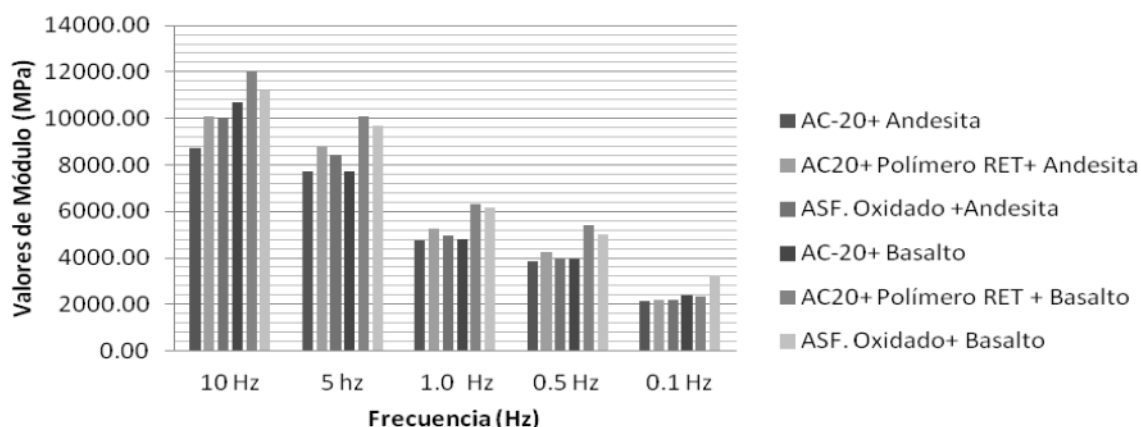
Para el Módulo Dinámico se ensayaron los especímenes en la prensa dinámica de acuerdo a la norma ASTM D 3497 usando las frecuencias de 10, 5, 1.0, 0.5, y 0.1 Hertz a una temperatura de 20° C con dos horas de acondicionamiento previas al ensaye obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 7: Valores de Módulo Dinámico (MPa)

FRECUENCIA	AC-20+ Andesita	AC-20+ Basalto	AC20+ Polímero RET + Andesita	AC20+ Polímero RET + Basalto	AC-20 Oxidado + Andesita	AC20 Oxidado + Basalto
Módulo Dinámico (10 Hz)	8725	10706	10101	12039	10030	11211
Módulo Dinámico (5 Hz)	7707	7726	8786	10070	8447	9695
Módulo Dinámico (1.0 Hz)	4778	4795	5276	6302	4931	6149
Módulo Dinámico (0.5 Hz)	3856	3925	4261	5388	3941	4999
Módulo Dinámico (0.1 Hz)	2162	2409	2193	2341	2167	3223

De acuerdo a los análisis obtenidos se observan los valores bajos de Módulo para el asfalto convencional AC-20. Para los valores de AC-20+ polímero RET se observa una menor variación de Módulo entre frecuencias y para los valores de asfalto envejecido se obtuvieron los valores mas altos de Módulo al estar compuesto por un asfalto mas rígido, la probeta presenta una mejor relación entre la deformación y el esfuerzo aplicado, lo que resulta coherente con respecto a la teoría, pero resultando seguramente en una vida a fatiga más corta.

Figura 2: Módulo Dinámico (MPa) de mezclas asfálticas a diferentes frecuencias (Hz)



Otra característica observada en el ensayo de Módulo Dinámico es que pone a prueba las características mecánicas del agregado al observarse que el Basalto presenta los valores de Módulo mayores como se muestra en la **tabla 7** y en la **figura 2**, es decir, con un agregado que cumpla con una caracterización adecuada en las pruebas básicas se garantiza un mejor comportamiento en el Módulo Dinámico.

Módulo Resiliente

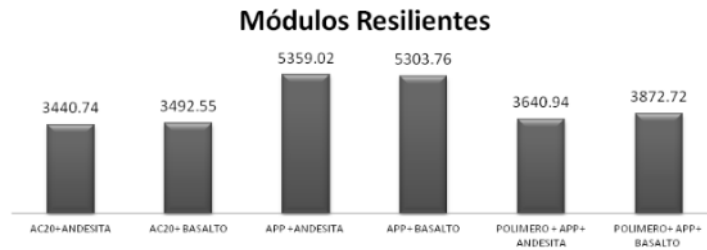
Para el Módulo Resiliente se corrió un número de 4 especímenes a una temperatura de 20 °C por cada tipo de mezcla con el propósito de hacer un análisis más completo, además de ser un ensaye menos sensible en comparación con el ensaye de Módulo Dinámico. Las mezclas fueron las mismas que se usaron para el Módulo Dinámico, por lo que en la tabla 8 se presentan los promedios de las pruebas así como su composición.

Tabla 8: Valores de Módulo Resiliente (MPa)

Muestra	Módulo Resiliente a 20°C (MPa)
AC20+Andesita	3440 MPa
AC20+ Basalto	3492 MPa
Asfalto Oxidado +Andesita	5359 MPa
Asfalto Oxidado + Basalto	5303 MPa
Polímero RET+ APP+ Andesita	3640 MPa
Polímero RET+ APP+ Basalto	3872 MPa

La tendencia en los resultados es muy similar a los obtenidos en el Módulo Dinámico, sin embargo la diferencia de resultados entre un mismo tipo de mezcla pero con diferente agregado es muy poca, nuevamente el Basalto es el que mostró el mejor comportamiento en el ensayo. Por otra parte al ser un Módulo que pone a prueba la calidad del asfalto usado se observa que el asfalto envejecido muestra un mayor Módulo en comparación con los demás asfaltos.

Figura 3: Gráfica de Módulos Resilientes para los diferentes tipos de mezclas (valores en MPa)



CONCLUSIONES

La infraestructura carretera es el motor del desarrollo socio-económico de las naciones, por lo tanto, es fundamental contar con pavimentos que permitan una circulación segura, rápida y cómoda y que generen costos de operación bajos.

Sin embargo, la realidad mexicana es diferente, ya que no contamos con pavimentos de calidad y una de las razones es la falta de estudios adecuados sobre las características de los materiales empleados en su construcción.

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 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 decidimos 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.

Por el contrario, el Módulo Resiliente no mide tan claramente la diferencia de agregados, pero hace una clara diferencia entre asfaltos.

Sin embargo, es importante resaltar que el uso solo de ensayos de Módulo para caracterizar las mezclas asfálticas, podría tender a promover el uso de asfaltos “endurecidos” que no tendrán necesariamente un buen desempeño a fatiga.

Por lo tanto, es importante determinar las leyes de fatiga de estas mezclas asfálticas para poder comprobar que combinación se comporta mejor, en la que es muy probable que los asfaltos “endurecidos” presenten leyes de fatiga desfavorables.

Por esta razón se continuará esta investigación para la obtención de leyes de fatiga y completar el análisis y sus conclusiones.

REFERENCIAS

- 1.- 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.
- 2.- Sandoval I. Cremades I., “Caracterización de asfaltos mediante creep repetido multiesfuerzo en reómetro de corte dinámico”. V Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2007.
- 3.- Recomendación, Diseño de mezclas de granulometría densa de alto desempeño. PA-MA-001/2008 (AMAAC, 2008)