



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS QUE INCORPORAN POLVO DE NEUMÁTICOS POR VÍA SEMIHÚMEDA MEDIANTE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS MATERIALES.

Eliceth Lljaira Roa Hernández¹, Jorge Alarcón Ibarra²,
Rey Omar Adame Hernández³, C. Enrique Villa Huerta⁴ Hugo Bandala Vásquez⁵

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 2146558e@umich.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, jorge.alarcon@umich.mx

³ Lasfalto, S. De R.l. De C.V., Guadalajara, México, omar.adame.hdez85@gmail.com

⁴ Lasfalto, S. De R.l. De C.V., Guadalajara, México, evilla@lasfalto.com.mx

⁵ Neotech® Asphalt, Guanajuato, México, hbandala@neotechasphalt.mx

Resumen

En este estudio se fabricaron mezclas asfálticas tibias que incorporan por vía semihúmeda 2% de polvo de neumáticos (CR) y se evaluaron ante ensayos de desempeño: módulo resiliente, módulo dinámico, número de flujo y ensayo de fatiga bajo carga repetida con un modo de carga constante utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT). Asimismo, se evaluó una mezcla en caliente con asfalto convencional, una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con polímero y una mezcla asfáltica en caliente que incorpora CR, a fin de poder comparar el desempeño de la mezcla asfáltica tibia. Los resultados mostraron que una mezcla asfáltica con asfalto modificado con un aditivo orgánico para mezclas tibias y que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda puede ser mezclada a 135°C y compactada a 125°C, presentó un comportamiento y características similares al de una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con terpolímero RET, asimismo obtuvo un mejor desempeño que una mezcla asfáltica en caliente elaborada con asfalto PG 64-22.

Palabras Clave: mezcla asfáltica tibia, módulo resiliente, módulo dinámico, número de flujo, fatiga.

1 Introducción

Las vías terrestres son parte fundamental del desarrollo de un país, no solamente constituyen una vía principal de comunicación, sino que generan desarrollo social y crecimiento económico, sin embargo, la construcción de carreteras es siempre un gran consumidor de energía y recursos [1]; asimismo, con el desarrollo de las vías cada día son más los vehículos que circulan por ellas, el crecimiento indiscriminado del parque vehicular no solo aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero NOx, sino que deja como resultado una gran cantidad de Neumáticos Fuera de Uso NFU. De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [2] en el año 2021 México tenía un parque vehicular de 53,115,396, lo cual, a su vez, genera millones de NFU.

La gestión de residuos se ha convertido en un problema crítico para el desarrollo sostenible, además de causar problemas económicos, sociales y de seguridad. Los NFU, en particular, tienen un costo medioambiental enorme [3].

Por lo antes descrito, el desarrollo de tecnologías de pavimentación sostenibles con menos consumos de recursos y energía, así como con menos emisiones de gases de efecto invernadero y que involucren el reciclaje de residuos sin afectar las propiedades mecánicas de las mezclas se ha convertido en una necesidad [1]. Se han desarrollado diferentes investigaciones acerca de tecnologías que permitan reducir el consumo energético, así como el reciclaje de residuos. Uno de los residuos



que ha sido ampliamente investigado desde los años 60 como modificador del cemento asfáltico es el polvo de NFU [4].

El reciclaje de neumáticos de desecho ha sido de interés para la industria del asfalto en todo el mundo, ya que los pavimentos que contienen aglutinantes modificados con polvo de neumático (CR) utilizan productos de desecho y se ha demostrado que las mezclas que incorporan CR o mezclas ahuladas tienen un rendimiento mecánico mejorado en comparación con mezclas asfálticas en caliente tradicionales [5]; no obstante, los métodos típicos de incorporación del CR en la mezcla asfáltica: (a) proceso seco, (b) proceso húmedo y (c) terminal - blend [6] han obstaculizado su uso, debido a que, se requieren equipos adicionales, los periodos de digestión extienden el proceso de fabricación de la mezcla, una vez que el asfalto ha sido modificado no se puede almacenar ya que la diferencia de densidades entre el asfalto y el hule provoca una separación de fases; lo que caracteriza la sedimentación del caucho residual en los ligantes a través del tiempo y un fallo prematuro en el producto por la pérdida de adhesión y envejecimiento de la mezcla [7].

Una nueva alternativa que permite la incorporación del hule molido de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas sin la necesidad de grandes inversiones en equipo y con la posibilidad de incorporar grandes tasas de hule es a través de la vía semihúmeda. La vía semihúmeda se implementa al hacer uso de un producto que, está compuesto por hule reciclado, al cual se le realiza un procesamiento de activación, que consiste en un tratamiento químico-termo-mecánico del polvo de caucho que equivale al proceso de digestión que tiene lugar tanto en el proceso por la vía húmeda como por la vía seca, pero realizado en una planta industrial totalmente independiente de aquella que fabrica la mezcla asfáltica, para no interferir con el proceso de preparación de la misma.

La incorporación del CR por vía semihúmeda es una respuesta a la problemática de las metodologías de incorporación del polvo de neumáticos en la mezcla asfáltica, sin embargo, las temperaturas de mezcla y compactación de las mezclas modificadas con CR son considerablemente más altas que una mezcla asfáltica en caliente elaborada con asfalto convencional; la solución a este problema podría ser la tecnología de Mezclas Asfálticas Tibias (MAT), que es capaz de reducir las temperaturas de producción y compactación, de igual forma se reduce la pérdida de volátiles lo cual mejora las condiciones de trabajo tanto en los sitios de pavimentación como en las plantas de producción [8] [9].

En la literatura podemos encontrar estudios desde el 2007 [10] que se han realizado para evaluar el desempeño de las propiedades reológicas del asfalto modificado con aditivos de mezcla en tibio y polvo de neumático vía húmeda [11], [12] [13], [14]; la incorporación mediante un proceso seco [15], [16], [17], pero pocos trabajos de investigación han abordado en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica tibia que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda. Por lo tanto, el estudio actual se llevó a cabo para examinar los efectos del hule de neumáticos incorporado por vía semihúmeda en una mezcla asfáltica tibia, comparados con el desempeño de mezclas asfálticas en caliente.

El rendimiento a largo plazo del pavimento está asociado con varios factores, como la estructura del pavimento, los materiales, la carga de tráfico y las condiciones ambientales, estructuralmente también depende de la influencia que puede generar un aditivo y el polvo de neumáticos adicionado mediante vía semihúmeda en las mezclas; por ello en este trabajo se evalúan dos mezclas asfálticas fabricadas con asfalto modificado con TB-1, aditivo orgánico empleado en México para la elaboración de mezclas asfálticas tibias, a las cuales también se les incorporó 2% de polvo de neumáticos en relación a la masa de los agregados, asimismo se fabricaron tres mezclas asfálticas en calientes (una mezcla asfáltica en caliente (MAC) con asfalto PG 64-22, una MAC con asfalto modificado con polímero y una mezcla asfáltica en caliente con 2% de polvo de neumáticos incorporado por vía semihúmeda), establecidas como mezclas de control para comparar el desempeño de las MAT evaluadas mediante ensayos dinámicos: módulo resiliente, módulo dinámico, número de



flujo para evaluar la deformación permanente y ensayo de fatiga bajo carga repetida, con un modo de carga constante utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT).

2 Métodos de prueba

Para la evaluación de las mezclas asfálticas, los métodos de prueba realizados fueron:

- i. Módulo resiliente (MR),
- ii. Módulo dinámico (MD),
- iii. Número de flujo (FN) y
- iv. Tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (ITT).

3 Plan experimental

Para llevar a cabo este estudio se fabricaron mezclas asfálticas de granulometría densa con agregado pétreo triturado de origen basáltico proveniente del banco “Asfaltos Guadalajara” Tonalá, Jalisco. Se evaluaron cinco mezclas asfálticas, las cuales se describen en la Tabla 1, se realizaron 3 mezclas en calientes (MAC), establecidas como mezclas de control para comparar el desempeño de las mezclas asfálticas tibias, todas las mezclas se sometieron a los ensayos detallados en la sección 2.

Tabla 1. Mezclas evaluadas en el estudio.

Mezcla	Nomenclatura	Granulometría, tamaño nominal ½”	Clasificación del asfalto	Contenido de asfalto (%)	Temperatura de mezclado y compactación (°C)
Mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64- 22	MAC Densa PG 64-22	60% grava, 39% arena, 1% carbonato de calcio	PG 64-22	6.2	158°C-148°C
Mezcla asfáltica en caliente + Terpolímero RET	MAC Densa + Terpolímero RET	60% grava, 39% arena, 1% carbonato de calcio	PG 82-22	6.4	175°C-165°C
Mezcla asfáltica en caliente +2% CR	MAC Densa +2% CR	60% grava, 37% arena, 1% carbonato de calcio, 2% CR	PG 64-22	5.6	180°C-170°C
Mezcla asfáltica en tibia + 2% CR	MAT Densa + 2% CR	60% grava, 37% arena, 1% carbonato de calcio, 2% CR	PG 70-22	5.6	135°C-125°C
Mezcla asfáltica en tibia + 2% CR	MAT Densa + 2% CR	60% grava, 37% arena, 1% carbonato de calcio, 2% CR	PG 70-22	5.6	135°C-115°C



3.1 Módulo resiliente

El ensayo de módulo resiliente permite evaluar la respuesta elástica de la mezcla asfáltica, se realizó conforme la normativa española UNE – EN 12697-26 anexo C. Para este estudio se fabricaron tres especímenes cilíndricos por cada tipo de mezcla, de 100 mm de diámetro y 6.35 cm de altura, con un 4% de vacíos de aire.

El ensayo se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Modo de carga: Esfuerzo controlado de 350 kPa
- Frecuencia: 3 s (0.1s carga, 0.9s de reposo)
- Deformaciones medidas: deformación horizontal
- Temperatura de prueba: 20°C
- Acondicionamiento en aire: 2 horas

3.2 Módulo dinámico

El módulo dinámico permite evaluar el comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas, el procedimiento de prueba se realizó conforme la norma AASHTO T 378-17, para este ensayo en este estudio se fabricaron 15 especímenes (tres por cada variable), se ensayaron a una temperatura de 20°C, con frecuencias de 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz y 0.1 Hz. Cada espécimen se ensayó para cada una de las 5 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga, comenzando de la frecuencia más alta a la más baja. Durante el ensayo, se mide el esfuerzo y la deformación por medio de una celda de carga y LVDTs, respectivamente. La deformación del espécimen debe mantenerse dentro del rango lineal, entre 50 y 150 $\mu\epsilon$, por lo que la carga aplicada fue ajustada para cada frecuencia y temperatura para alcanzar el nivel de deformación apropiado.

3.3 Número de flujo

El protocolo de prueba de número de flujo NF fue desarrollado e introducido en el Proyecto NCHRP 9-19 como una prueba de rendimiento simple para evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente en las mezclas asfálticas en caliente. En este estudio el ensayo se realizó conforme la norma AASHTO T 378-17, para este ensayo se fabricaron 15 especímenes (tres por cada variable), con un diámetro de 100 mm y una altura de 150 mm, se ensayaron a una temperatura de 40°C.

Proyecto NCHRP 9-19 recomendó realizar la prueba FN a una temperatura efectiva del pavimento en un modo no confinado con un esfuerzo vertical entre 68,9 y 206,8 kPa, en este estudio se esfuerzo desviador utilizado fue de 250 kPa, la prueba se fijó para terminar en 10 000 ciclos.

3.4 Tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (ITT)

Para evaluar la vida a fatiga de las mezclas se utilizó el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (ITT), este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas cuando se someten a una carga repetida, el proceso de la prueba se realizó conforme la normativa UNE EN-12697-24; la vida a fatiga se determina con el número total de aplicaciones de carga que causa una rotura completa de la probeta. Para la ejecución del ensayo se fabricaron 9 especímenes por tipo de mezcla, para un total de 45 probetas, con un diámetro de 100 \pm 3 mm y con un espesor de 63.5 \pm 3 mm, con 4% de vacíos de aire.

Las probetas se ensayaron a tres niveles de esfuerzo 250 kPa, 350 kPa y 450 kPa, acondicionadas a 20 °C. Se aplicó una carga repetida de medio senoverso durante un tiempo de carga de 0,1 s y un tiempo de descanso de 0,4 s.

4 Resultados y análisis

4.1 Módulo resiliente

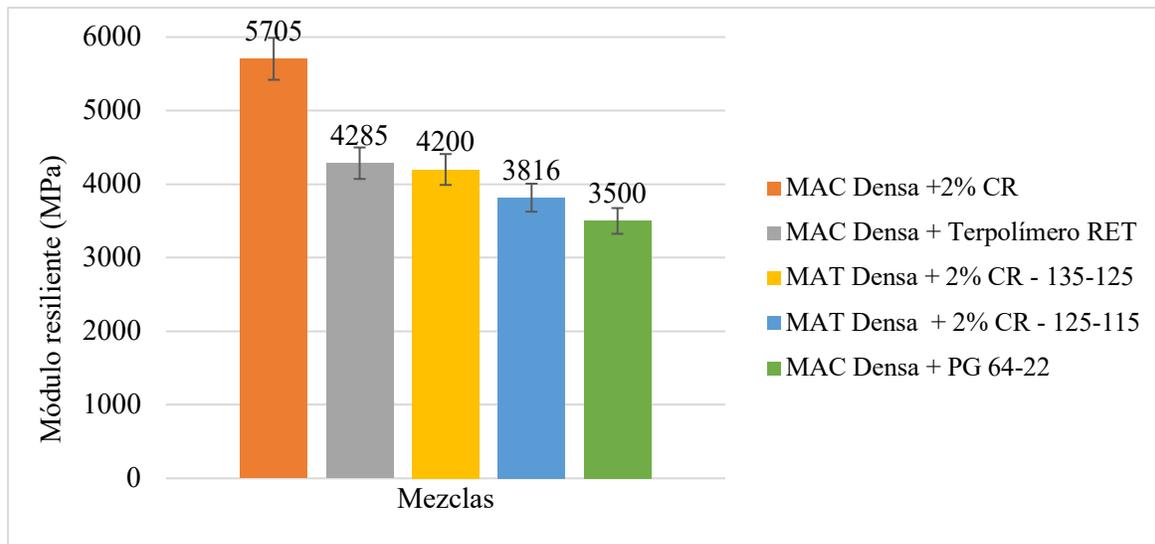


Figura 1. Resultado del ensayo de módulo resiliente.

Se determinaron los módulos resilientes en dos mezclas asfálticas tibias de granulometría densa que incorporan 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda, en las cuales se diferencian entre sí por la temperatura de compactación; una se compactó a 125°C y otra a 115°C y también se determinaron los módulos resilientes de tres mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa; una elaborada con asfalto PG 64-22 con una temperatura de mezclado de 158°C, la segunda se elaboró con asfalto modificado con terpolímero RET con temperatura de mezclado de 175°C y la tercera se elaboró con asfalto PG 64-22 incorporándole 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda a una temperatura de mezclado de 180°C.

Los resultados del módulo resiliente o módulo de rigidez se muestran en la Figura 1., en la cual se puede apreciar que la mezcla con mayor módulo de rigidez a una temperatura de 20°C y con un esfuerzo aplicado de 350 kPa, fue la mezcla asfáltica en caliente que contiene polvo de neumáticos incorporado por vía semihúmeda.

La mezcla asfáltica tibia mezclada a 135°C y compactada a 125°C presenta un módulo de 4200 MPa, lo cual equivale a un 74% del módulo de la MAC que incorpora polvo de neumáticos, un 98% del módulo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y un 20% superior al de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22.

La mezcla asfáltica tibia mezclada a 135°C y compactada a 115°C presenta un módulo de 3816 MPa, lo cual equivale a un 67% del módulo de la MAC que incorpora polvo de neumáticos, un 89% del módulo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y un 9% superior al de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22.

4.2 Módulo dinámico

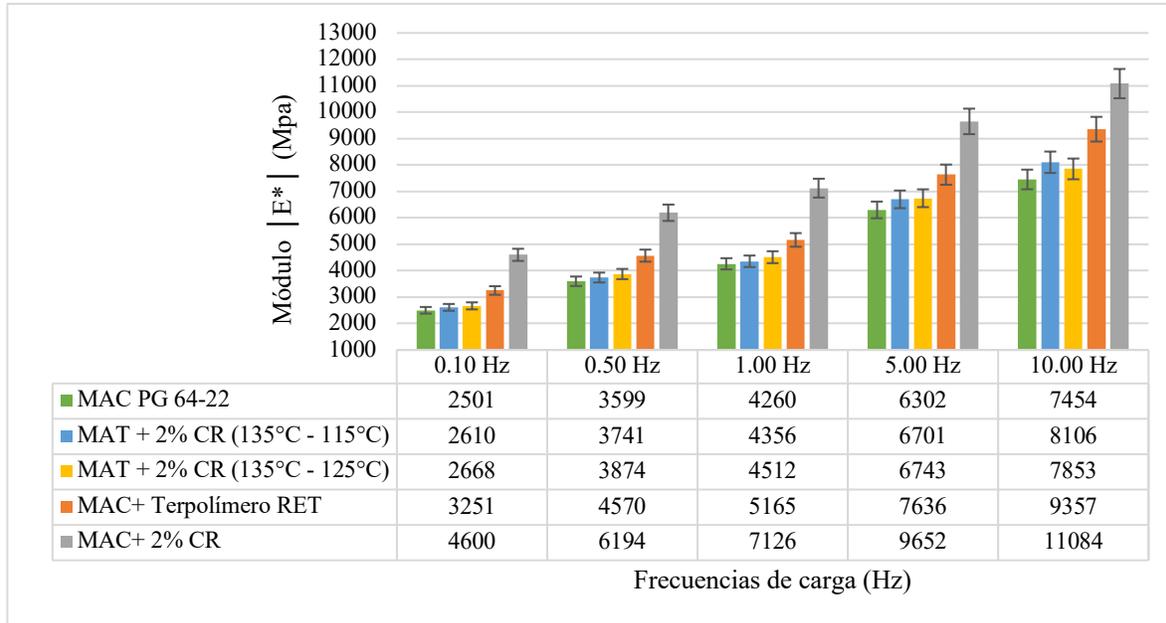


Figura 2. Módulo dinámico de las mezclas a diferentes frecuencias de carga.

La Figura 2., muestran los resultados obtenidos de módulo dinámico para las mezclas en estudio, a una temperatura de 20°C y a frecuencias de 0.1Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz; La mezcla con mayor módulo dinámico en todas las frecuencias que se realizó el ensayo fue la mezcla asfáltica en caliente que incorpora un 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda y la mezcla con los menores valores de módulo corresponde a la mezcla asfáltica en caliente elaborada con asfalto PG 64-22.

Para este ensayo las dos mezclas asfálticas tibias obtuvieron valores de módulo muy similares, siendo las diferencias entre ellas no mayores al 4% y corresponden entre el 80 y 88% de los valores de módulos resultantes para la mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros y entre un 5 y 8% superiores a los de módulos de la MAC con asfalto PG 64-22.

En relación con la mezcla asfáltica en caliente con CR, los módulos de las mezclas asfálticas tibias obtuvieron entre el 57% y 74% de los resultados obtenidos para la MAC que incorpora polvo de neumáticos por vía semihúmeda.

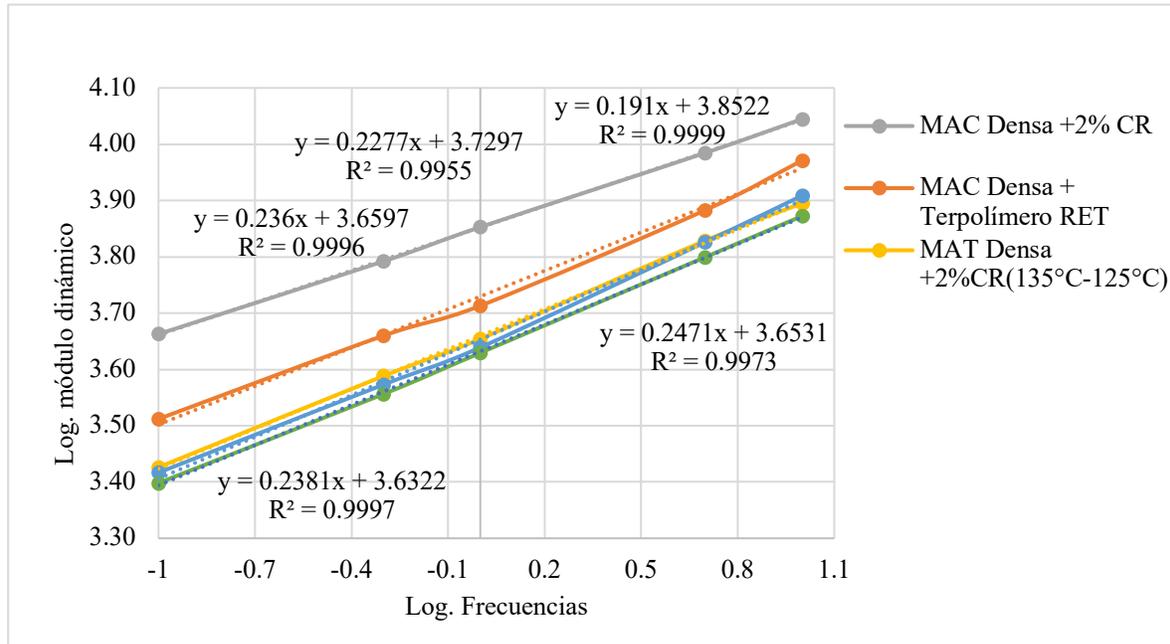


Figura 3. Relación entre los módulos y las frecuencias de carga en escala logarítmica.

A como se esperaba, los resultados muestran que a medida que las frecuencias de carga disminuyen, los módulos de cada una de las mezclas también decrecen, por lo cual en la Figura 3., se graficaron los resultados de los módulos en escala logarítmica y las frecuencias correspondientes, de igual forma en escala logarítmica, a fin de determinar cuál de las mezclas presentó mayor susceptibilidad a disminuir su módulo con los cambios de frecuencia. Se observa que la mezcla con una menor pendiente fue la MAC +2% CR, siendo de 0.191, lo cual indica que es la mezcla con menor susceptibilidad a la deformación por la presión de las cargas, seguido de la MAC + Terpolímero RET con una pendiente de 0.2277, las mezclas asfálticas tibias por su parte presentaron pendientes de 0.236 y 0.2471, siendo este último resultado el de la MAT compactada a 115°C.

4.3 Número de Flujo

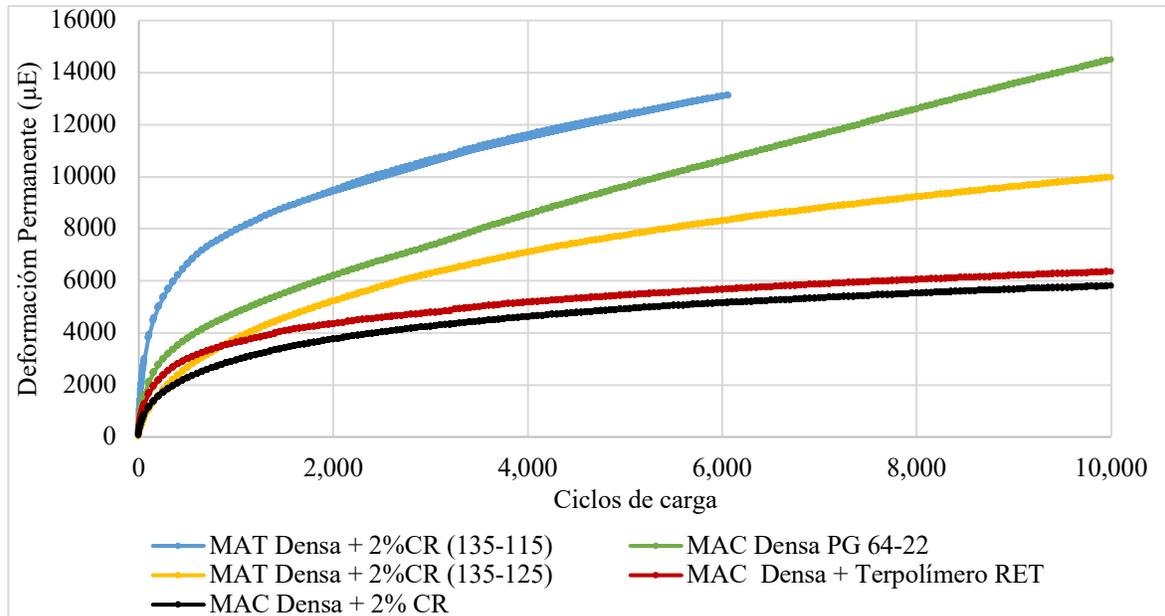


Figura 4. Gráfica de la deformación permanente acumulada mediante el ensayo número de flujo.

Los resultados obtenidos del ensayo número de flujo se presentan en la Figura 4., la MAC modificada con polvo de neumáticos y la MAC modificada con polímeros fueron las que presentaron menor deformación 6,000 y 7,000 $\mu\epsilon$ respectivamente a los 10 mil ciclos de carga, la MAT elaborada a 135°C y compactada 125°C presentó una deformación de 11,500 $\mu\epsilon$ y la MAC con asfalto PG 64 - 22 una deformación de 14,500 $\mu\epsilon$ y la MAT elaborada a 135°C y compactada a 115°C obtuvo una deformación de 13,000 $\mu\epsilon$ a los 6 mil ciclos de carga.

4.4 Ensayo de tracción indirecta

Tabla 2. Resultados de ensayos de fatiga a diferentes esfuerzos.

Variable	250 kPa	350 kPa	450 kPa
MAC Densa +2% CR	60000	27039	5556
MAC Densa + Terpolímero RET	45544	13795	4372
MAT Densa + 2% CR - 135-125	42664	12840	4273
MAT Densa + 2% CR - 135-115	35773	10507	2857
MAC Densa PG 64-22	12551	4620	2593

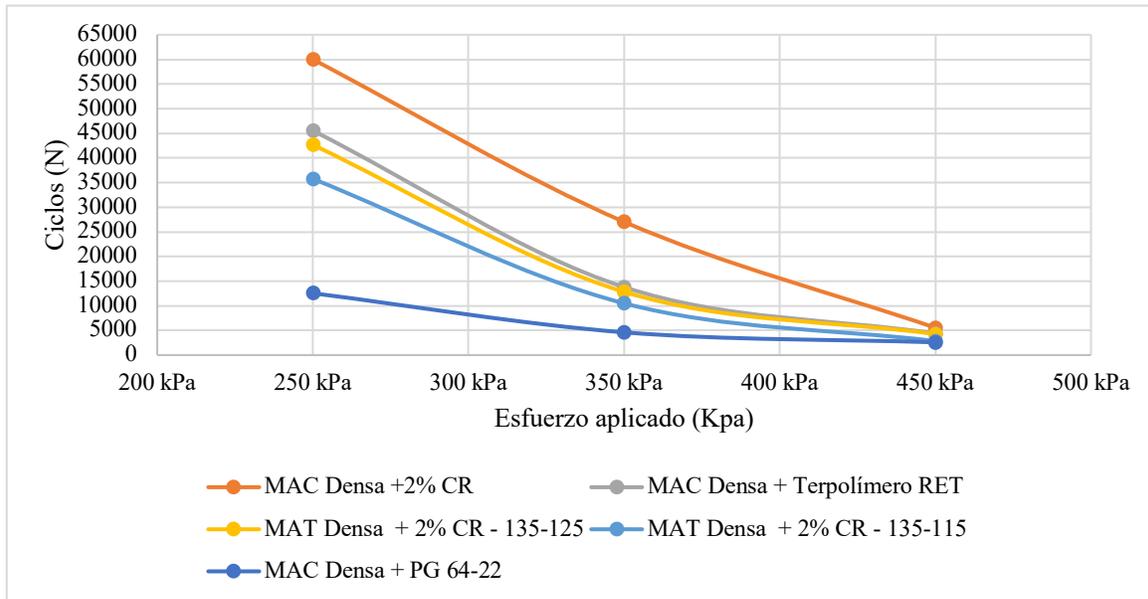


Figura 5. Resultado de ensayo de tracción indirecta.

En la tabla 2 y figura 5., se muestran los resultados de fatiga bajo carga repetida de las mezclas, utilizando el ensayo de tracción indirecta (ITT), todas las probetas se llevaron a la falla con los diferentes esfuerzos de carga, para determinar su resistencia a la fatiga, la MAC con CR es la que resistió más ciclos de carga antes de llegar a la fractura, seguido de la MAC con polímeros, la mezcla asfáltica tibia fabricada a 135°C y compactada a 125°C, obtuvo un comportamiento muy similar al de la MAC modificada con polímeros, la MAT compactada a 115°C resistió menos ciclos de carga, sin embargo con 250 kPa y 350 kPa duplicó los ciclos de carga de la MAC con asfalto PG 64-22.

Con un esfuerzo de 250 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22 la MAC con polvo de neumáticos fue superior en un 478%, la MAT con polvo de neumático compactada a 125°C fue superior en un 340% y cuando se compacto a 115°C en un 285%.

Con un esfuerzo de 350 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22 la MAC con CR fue superior en un 585%, la MAT con polvo de neumático compactada a 125°C un 278% y cuando se compacto a 115°C en un 227%.

Con un esfuerzo de 450 kPa, con relación a la MAC con un asfalto PG 64-22 la MAC con CR fue superior en un 214%, la MAT con polvo de neumático compactada a 125°C un 165% y cuando se compacto a 115°C en un 110%.

5 Conclusiones

En este estudio se evaluaron las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas tibias elaboradas con asfalto modificado con un aditivo orgánico (TB-1) que además incorporan 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda, para ello se llevaron a cabo una serie de ensayos dinámicos: MR, MD, ITT y FN, estos ensayos también se les realizaron a tres mezclas asfálticas en caliente establecidas como mezclas de control, una MAC con asfalto PG 64-22 fabricada a 158°C, una MAC con asfalto modificado con terpolimero RET elaborada a 175°C y una MAC con 2% de polvo de neumáticos



fabricada a 180°C. Las mezclas asfálticas tibias se elaboraron a 135°C, pero una se compactó a 125°C y la otra a 115°C. Se extrajeron las siguientes conclusiones:

Los valores de módulo resiliente resultaron mayores para la mezcla asfáltica en caliente que incorpora 2% de polvo de neumáticos y para la mezcla asfáltica modificada con terpolímero RET, lo cual indica que son mezclas más rígidas, la mezcla asfáltica tibia compactada a 125°C obtuvo un valor de módulo que equivale al 98% del valor de módulo de la mezcla asfáltica modificada con polímeros, un 74% de la MAC+CR y superó un 20% del valor obtenido por la MAC con asfalto PG 64-22, lo cual indica que el polvo de neumáticos mejora la elasticidad de la mezcla asfáltica tibia.

La mezcla asfáltica tibia compactada a 115°C obtuvo un MR que equivale al 67% del módulo determinado para la MAC con 2% de polvo de neumáticos, 89% del módulo de la MAC con asfalto modificado con Terpolímero RET y superó en un 9% el valor de módulo de la MAC con asfalto PG 64-22, lo que indica que una reducción de 10°C más de temperatura en la compactación afecta el módulo resiliente de la mezcla asfáltica tibia con 2% de polvo de neumáticos.

Los resultados del ensayo de módulo dinámico a 20°C y con frecuencias de 0.1Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz mostró que la mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa que incorpora 2% de polvo de neumáticos es la que presentó mayores valores de módulo en las distintas frecuencias, seguido de la MAC modificada con terpolímero RET; las mezclas asfálticas tibias presentaron valores de módulo dinámico muy similares entre sí, en relación con los módulos obtenidos para la MAC con CR, estos se encuentran entre el 57 y 74%, sin embargo, con relación a la mezcla modificada con Terpolímero RET, los módulos de las MAT equivalen a valores entre el 80 y 88% de estos y son superiores a los módulos de la MAC con asfalto PG 64-22 en un rango del 5 y 8%. Asimismo, se identificó que la MAC con 2% de CR es la mezcla cuyo módulo es menos susceptible al cambio de frecuencias, lo cual se encuentra relacionado con la variación en la presión de cargas aplicadas a la mezcla asfáltica.

El ensayo de número de flujo no permitió determinar el número de flujo de las variables, el cual corresponde al ciclo donde finaliza la fase secundaria e inicia la terciaria y todas las variables al ser graficadas se puede observar que continúan en la fase secundaria de deformación, no obstante, muestra la susceptibilidad a la deformación de las mezclas. La mezcla asfáltica tibia con temperatura de mezclado de 135°C y compactada a 115°C es la que presentó mayor deformación a los seis mil ciclos de carga en comparación con las mezclas de control, la mezcla asfáltica tibia compactada a 125°C presentó menor deformación que la mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22. En estudios futuros se recomienda incrementar la carga del ensayo o el número de ciclos para determinar el número de flujo y hacer un mayor análisis con relación a la deformación permanente.

Respecto a la resistencia a la fatiga, las mezclas asfálticas tibias tuvieron un comportamiento diferente mostraron que 10°C de reducción de temperatura de compactación reduce también la vida a fatiga de la mezcla, sin embargo, los resultados de ambas son mayores al de una mezcla asfáltica en caliente con asfalto PG 64-22 lo que indica que el polvo de neumáticos incorporado vía semihúmeda incrementa la vida a fatiga de la mezcla. La mezcla asfáltica tibia mezclada a una temperatura de 135°C y compactada a 125°C presentó resultados que equivalen a más del 90% de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica modificada con polímeros.

Finalmente, el estudio demuestra que la mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa elaborada con asfalto PG 64-22 pero que incorpora 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda es la que resultó con un mejor desempeño en todos los ensayos realizados en comparación a todas las variables en estudio, lo cual indica que el polvo de neumáticos mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente. El uso del polvo de neumáticos en una mezcla asfáltica tibia elaborada con un aditivo orgánico e incorporando un 2% de polvo de neumáticos por vía semihúmeda dio como resultado una mezcla con un comportamiento similar al de una mezcla asfáltica elaborada con un asfalto modificado con polímeros; con la ventaja que la mezcla asfáltica tibia se mezcló y



compactó a 30°C menos, lo cual indica una reducción en el uso de combustible, menor exposición de los trabajadores a los vapores del asfalto y menos emisiones de gases de NOx durante la producción, tendido y compactación de la mezcla.

6 Referencias

- [1] Swedish National Road Administration, «Life Cycle Assessment of Road, A Pilot Study for Inventory Analysis,» IVL Swedish Environmental Research Institute , Gothenburg, Sweden, 2001.
- [2] INEGI, "INEGI," 13 junio 2023. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>.
- [3] A. M. Rodríguez Alloza y J. Gallego, «Curvas maestras de aglutinantes modificados con caucho granulado que contienen ceras Montan como aditivos de asfalto de mezcla tibia,» *6° Congreso Eurasphalt & Eurobitume*, p. 2, 2016.
- [4] E. Rodríguez Castro, «Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos,» *PITRA-LannameUCR*, p. 3, 2016.
- [5] M. Akpolat, . B. Vural Kök y M. Y. Yilmaz , «Performance and Aging Characteristics of Hot Mixture Asphalt with Crumb Rubber and Warm Mix Asphalt Additives,» *ASCE*, pp. 1-12, 2020.
- [6] X. Yang, Z. You, . M. R. Mohd Hasan, A. Diab, . H. Shao, S. Chen and D. Ge, "Environmental and Mechanical Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix Environmental and Mechanical Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix," *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-34, 2017.
- [7] J. Alarcón Ibarra y D. Bocanegra Matínez , «Ventajas de uso de hule molido de neumáticos fuera de uso (NFU) en la modificación de asfaltos,» UMSNH, Morelia, Michoacán , 2021.
- [8] A. M. Rodríguez Alloza y J. Gallego, «Mechanical performance of asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives,» *Materials and Structures*, pp. 1-9, 2017.
- [9] O. J. Reyes Ortiz , L. G. Fuentes Pumarejo y O. H. Moreno - Torres , «Comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con asfaltos modificados con ceras,» *Ingeniería y Desarrollo*, pp. 161-178, 2013.
- [10] C. K. Akisetty, S.-J. Lee y S. N. Amirkhanian, «High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives,» *Construction and Building Materials* , pp. 565-573, 2007.
- [11] T. A. Ahmed, E. Y. Hajj, . D. S. Bahzad, M. Piratheepan y . A. Warrag, «Investigation of the Rheological and Bonding Characteristics of Crumb Rubber-Modified Asphalt Binders Mixed with Warm Mix Asphalt Additive and Antistrip Agen,» *International Journal of Pavement Research and Technology*, p. 1, 11 Abril 2021.
- [12] S. Chen, J. Cao, C. Zheng y X. Guo, «Rheological Characteristics of Tire Rubber-Modified Asphalt following Thermal Variation,» *Hindawi*, pp. 1-9, 2021.
- [13] W. Gui, L. Wang, X. Gao y F. Zhang, «Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber modified asphalt based on rheological characteristics,» *Construction and Building Materials* , pp. 1-12, 2021.



- [14] M. Reza Pouranian, M. A. Notani, M. T. Tabesh, B. Nazeri y M. Shishehbor, «Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives,» *Construction and Building Materials* , pp. 1-17, 2020.
- [15] H. . I. Ozturk y . F. Kamran, «Laboratory evaluation of dry process crumb rubber modified mixtures containing Warm Mix Asphalt Additives,» *Construction and Building Materials*, pp. 1-10, 2019.
- [16] H. Yu, . Z. Zhu, . Z. Leng, C. Wu, Z. Zhang, D. Wang and M. Oeser, "Effect of Mixing Sequence on Asphalt Mixtures Containing Waste Tire Rubber and Warm Mix Surfactants," *Journal Cleaner Production*, pp. 1-39, 2019.
- [17] A. O. Yucel, H. I. Ozturk y M. Guler, «Influence of warm mix additive on internal structure of dry process crumb rubber modified mixtures,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-11, 2021.
- [18] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [19] M. W. Witzak, K. Kaloush, T. Pellinen y M. El-Basyouny, «NCHRP Report 465 Simple Performance Test for Superpave Mix Design,» Transportation Research Board, Washintong D.C, 2002.