



Evaluación de la tecnología de mezcla templada con altas tasas de material reciclado (RAP)

Alfonso Díaz¹, Rosita Martínez²,
Silverio Sampayo³, Jorge Mejía⁴, Eymard Ávila⁵

¹ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Alfonso.diaz@ergon.com

² Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Rosita.martinez@ergon.com

³ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Silverio.sampayo@ergon.com

⁴ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Jorge.mejia@ergon.com

⁵ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, Eymard.avila@ergon.com

Resumen

De la degradación ambiental y el desequilibrio entre oferta-demanda, surgió la economía circular EC como alternativa a la economía lineal.

La EC se entiende como la incorporación de medidas que permiten minimizar el impacto medioambiental y que, a su vez, suponen un alargamiento del uso y del valor de todos los recursos, energías y materiales implicados.

Dentro de la industria de la construcción de carreteras se cuenta con un activo valioso como el pavimento asfáltico recuperado (RAP). Este activo puede ser utilizado en diversas capas del pavimento, sin embargo, también se busca que sea utilizado en donde mayor valor pueda aportar alargando la vida útil del pavimento.

En este estudio se evalúa la utilización de RAP y emulsión asfáltica en una mezcla densa elaborada con la tecnología de mezcla templada (HWMA) utilizando un diseño balanceado por desempeño.

En México aún no existe una normativa ni especificaciones para el diseño de mezclas templadas.

Esta investigación propone una metodología en dos etapas, la primera etapa contempla el análisis del RAP, formulación de la emulsión asfáltica en función del envejecimiento del asfalto existente en el RAP y la selección del contenido óptimo de la emulsión asfáltica mediante la evaluación de desempeño de la mezcla a tres diferentes contenidos de emulsión mediante las pruebas de susceptibilidad al daño por humedad (TSR), módulo resiliente total (M_r) e IDEAL-CT. En la segunda etapa al contenido óptimo de la emulsión, se determina la curva maestra del módulo dinámico y la evaluación de la resistencia a la fatiga utilizando el ensaye de la Viga a Flexión en Cuatro Puntos.

Los resultados de la evaluación mecánica de la segunda etapa se compararon contra una mezcla asfáltica en caliente convencional (base negra) obteniendo resultados superiores para la mezcla templada.

Palabras Clave: Mezcla templada, economía circular, Emulsión asfáltica, RAP

1 Introducción

De la degradación ambiental y el desequilibrio entre oferta-demanda, surgió la economía circular EC como alternativa a la economía lineal [1].

La EC se entiende como la incorporación de medidas que permiten minimizar el impacto medioambiental y que, a su vez, suponen un alargamiento del uso y del valor de todos los recursos, energías y materiales implicados [2,3].



La economía circular permite ofrecer productos fabricados con menos recursos, utilizando materiales reciclados, ya sea por el rediseño de productos basados en mejoras incrementales a los productos existentes, o por el diseño de nuevos productos eficientes en recursos que pueden ser reparados, mejorados y reciclados [4].

Los proyectos sostenibles que buscan revertir o minimizar el impacto ambiental generado por la industrialización y transformar la huella ecológica actual en activos valiosos en general siguen el principio de las 6R: reutilizar, reciclar, rediseñar, remanufacturar, reducir y recuperar.

Dentro de la industria de la construcción de carreteras se cuenta con un activo valioso como el pavimento asfáltico recuperado (RAP). Este activo puede ser utilizado en diversas capas del pavimento, sin embargo, también se busca que sea utilizado en donde mayor valor pueda aportar alargando la vida útil del pavimento.

En este estudio se evalúa la utilización de RAP en una mezcla densa con emulsión asfáltica elaborada con la tecnología de mezcla templada (HWMA). La contribución de la tecnología HWMA con RAP bajo el enfoque de EC comparada contra la mezcla en caliente permite reducir el uso de materias primas, energía, y emisiones durante la fabricación y aplicación por medio del uso de recursos recuperados.

El asfalto es uno de los materiales más reciclados, sin embargo, solo un 10 a 20% de material de RAP es usado en diseños de mezclas y una gran parte es degradado en su uso en aplicaciones de menor valor [5]. La cantidad de RAP en mezclas asfálticas puede ser incrementado, considerando las actuales tecnologías y avances en los diseños de mezclas. Se ha documentado ampliamente la susceptibilidad al agrietamiento al usar altas tasas de RAP, sin embargo, la mayor parte de estos estudios han sido realizados en mezclas en caliente [6].

En contraparte se ha reportado el uso de mezclas templadas en mezclas drenantes y discontinuas en las que es posible reciclar mezcla bituminosa hasta tasas del 100% en planta [7].

El uso de emulsiones además permite disminuir el consumo de energía y disminuir las emisiones al ambiente con respecto a las mezclas en caliente [8].

2 Objetivo

El objetivo del estudio es evaluar la tecnología de mezcla templada con altas tasas de RAP como una alternativa de tecnología sustentable que minimice el impacto ambiental y que además tenga un desempeño y durabilidad similar o mejor que una mezcla asfáltica (base negra) en caliente convencional.

3 Metodología de diseño y materiales.

3.1 Metodología de diseño de la mezcla

Dado que en México no existe una normativa para el diseño y evaluación de las mezclas templadas con uso de 100% RAP donde se indique la metodología para la selección del contenido óptimo de la emulsión, tratamiento del RAP, temperaturas de mezclado y compactación y pruebas de desempeño, se plantea este trabajo como una alternativa de diseño y evaluación de mezclas templadas bajo el diseño balanceado con enfoque basado en el desempeño de la mezcla. [9]

Se proponen dos etapas de evaluación, la primera etapa contempla el análisis del RAP, formulación de la emulsión asfáltica en función del envejecimiento del asfalto existente en el RAP y la selección del contenido óptimo de la emulsión asfáltica mediante la evaluación de desempeño de la mezcla a tres diferentes contenidos de emulsión mediante las pruebas de TSR, M_{rt} e IDEAL-CT.

Una vez seleccionado el contenido óptimo de la emulsión, en la segunda etapa se contempla la evaluación de la mezcla mediante la determinación de la curva maestra del módulo dinámico y la evaluación de la resistencia a la fatiga utilizando el ensaye de la Viga a Flexión en Cuatro Puntos.

3.2 Materiales

3.2.1 RAP

3.2.1.1 Asfalto recuperado del RAP

La extracción del material asfáltico del RAP se realizó de acuerdo con ASTM D2172 (método B). La recuperación se realizó mediante un proceso de recirculación (evaporación-condensación) con Tricloro-Etileno (C_2HCl_3). El asfalto recuperado fue separado del disolvente utilizando el procedimiento ASTM D5404.

Se obtuvo el grado PG del asfalto extraído del RAP, bajo la normativa N·CMT·4·05·004/18 “Calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño” que cumplió como un grado PG 100-22.

El contenido de asfalto existente en el RAP se obtuvo por medio del método de ignición ASTM D6307 el cual fue de 7.4 % con respecto a la mezcla.

3.2.1.2 Agregados pétreos

Para la elaboración de la mezcla templada de este proyecto, se utilizó 100% RAP proveniente del pavimento asfáltico fresado del Periférico Ecológico de Puebla, en el estado de Puebla, México.

La granulometría del RAP se comparó con respecto a los límites establecidos en la norma N·CMT·4·02·003/21 de la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) para bases de mezcla asfáltica (base negra). Se utilizó una fracción única de $\frac{3}{4}$ " (19mm) a finos, retirando el material retenido en malla de una pulgada por medio de cribado. La granulometría de RAP fue obtenida considerando el material sin incinerar, cumpliendo satisfactoriamente con los límites ya mencionados como se muestra en la Figura 1.

Para la elaboración de la mezcla asfáltica control, se utilizaron agregados pétreos de la misma fuente con que se elaboró la capa original de donde se obtuvo el RAP que fue el banco Thomé ubicado en la ciudad de Puebla. La mezcla control fue elaborada con un contenido de 5.0% de cemento asfáltico convencional grado PG 64-22 con respecto a la mezcla. Se utilizó una granulometría que cumple con los límites establecidos en la norma N·CMT·4·02·003/21 de la SICT para bases de mezcla asfáltica (base negra) como se muestra en la Figura 1.

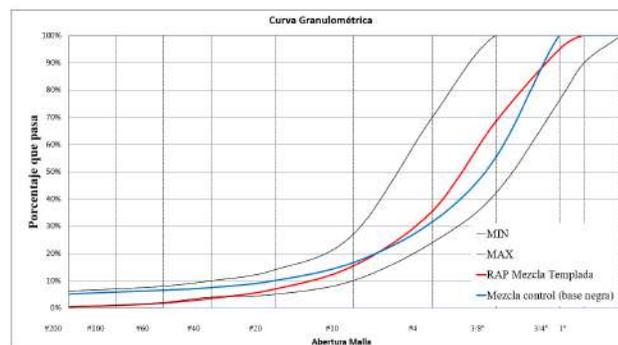


Figura 1. Granulometrías del RAP y de la mezcla control



3.2.2 Emulsión asfáltica

Se evaluaron diversos tipos y formulaciones de emulsiones basadas en el grado de envejecimiento del RAP obtenido en el apartado 3.2.1.1 y se seleccionó la emulsión que presentó la mejor compatibilidad con el RAP. La emulsión seleccionada es una emulsión asfáltica catiónica denominada EARA-2P cuyas características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la evaluación de la emulsión EARA-2P.

<i>Prueba</i>	<i>Método de prueba</i>	<i>Valor obtenido</i>
Pruebas a la emulsión asfáltica		
Contenido de cemento asfáltico, 204°C, %	ASTM D 6997	63.2
Contenido de aceite destilado, 204°C, %	ASTM D 6997	0.5
Viscosidad Saybolt Furol 25°C, SSF	ASTM D 7496	35.0
Retenido en malla no. 20, %	ASTM D 6933	0.0000
Asentamiento a 5 días, %	ASTM D 6930	0.20
Pruebas al residuo, obtenido por destilación		
Punto de reblandecimiento, °C	ASTM D 36	28.10
Jnr 0.1kPa ⁻¹ , 40°C	ASTM D 7405-20	1.49
R, 0.1kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	46.44
Jnr 3.2kPa ⁻¹ , 40°C	ASTM D 7405-20	2.72
R, 3.2kPa, 40°C, %	ASTM D 7405-20	22.94
G*/sen δ, 40°C, KPa	ASTM D 7175-15	2.60
Angulo de fase, 40°C, °	ASTM D 7175-15	73.10

3.3 Fabricación de especímenes de prueba.

Para la evaluación de las pruebas de desempeño de TSR, M_{rt} , IDEAL-CT y módulo dinámico se fabricaron especímenes cilíndricos mediante el compactador giratorio a un nivel de $7\pm 1\%$ de vacíos. La geometría de los especímenes fue de acuerdo con el tipo de prueba y el ajuste de vacíos se realizó bajo una compactación definida por altura.

Los especímenes para la evaluación de la resistencia a la fatiga se fabricaron mediante un compactador lineal produciendo slabs de los cuales se cortaron las vigas de prueba.

Con la finalidad de reducir la variabilidad en los resultados, los especímenes de prueba se armaron mediante granulometrías inversas con 6 tamaños de control que fueron: retenido en malla de $3/4''$, retenido en malla de $3/8''$, retenido en malla #4, retenido en malla #20, retenido en malla #60 y material que pasa la malla #60.

El mezclado se realizó calentando los agregados (RAP) a una temperatura de 90°C y la emulsión asfáltica a 60°C, teniendo como resultado la mezcla asfáltica a una temperatura de 70 a 75°C. La mezcla se curó en horno a una temperatura de 70°C por un tiempo de 2 horas y posteriormente se realizó la compactación de los especímenes de prueba. Una vez compactados los especímenes se curaron en horno a una temperatura de 50°C por un tiempo de 48 horas para eliminar la humedad restante en la mezcla.

3.4 Pruebas de desempeño

3.4.1 Susceptibilidad al daño por humedad (TSR) (AASHTO T283).

La susceptibilidad al daño por humedad es una prueba que consiste en determinar la relación de resistencias a la tensión indirecta, de una serie de especímenes cilíndricos acondicionados contra otros no acondicionados.

El grupo de especímenes sin acondicionar se evalúan a 25°C haciendo uso de la mordaza Lottman a una velocidad de aplicación de carga uniforme de desplazamiento de 50.8 mm/min.

El grupo de especímenes acondicionados son sometidos a un ciclo de congelamiento - deshielo y baño de agua caliente para su posterior evaluación de la tensión indirecta a 25°C.

Finalmente se calcula la relación de resistencia retenida a tensión indirecta (TSR) en % sin decimales como se muestra en la Ecuación 1.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad 1$$

Donde TSR es la resistencia al daño inducido por humedad, expresada en %, S_1 es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes no acondicionados en KPa, y S_2 es la resistencia a tensión indirecta promedio de especímenes acondicionados en KPa.

3.4.2 Módulo resiliente (ASTM D7369-11)

El módulo resiliente en tensión indirecta (M_r) se define como la relación que existe entre el máximo esfuerzo aplicado y la deformación recuperable a través de la aplicación de ciclos de carga y descarga de tipo haverseno, en especímenes sometidos a compresión diametral para producir un esfuerzo de tensión de manera indirecta.

Dos valores de módulo resiliente pueden ser calculados, el instantáneo y el total. El módulo resiliente instantáneo toma en cuenta la deformación cada ciclo en la fracción de descarga instantánea. El módulo resiliente total se calcula utilizando la deformación recuperable total la cual incluye la deformación instantánea y la deformación tiempo-dependiente que ocurre durante el periodo de reposo completo Figura 2.

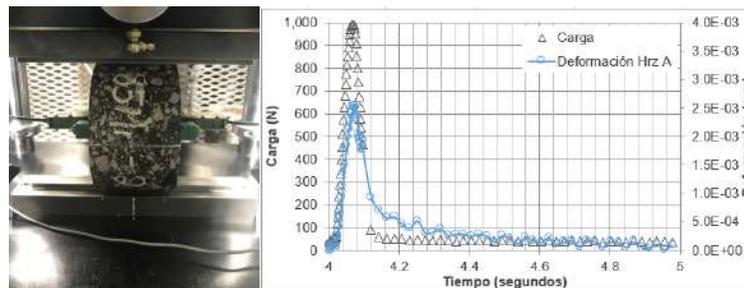


Figura 2. Prueba de módulo resiliente en tensión indirecta (ASTM D7369)

3.4.3 Índice de agrietamiento IDEAL-CT (ASTM D8225)

El IDEAL-CT es una prueba de agrietamiento desarrollada por el Instituto de transporte de Texas. Su objetivo es determinar el índice de agrietamiento de las mezclas asfálticas a temperaturas intermedias

(25°C). La prueba se evalúa a tensión indirecta aplicando carga monotónica a una velocidad de 50 mm/min, hasta la falla completa de la muestra. Figura 3

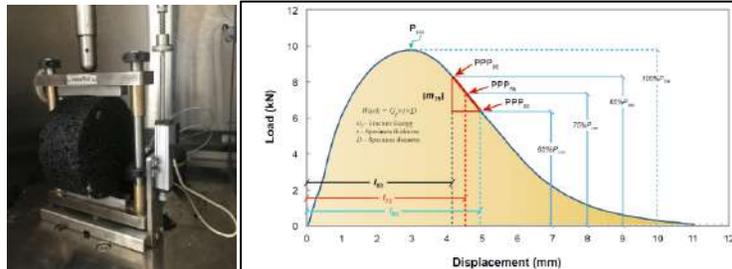


Figura 3. Prueba de IDEAL-CT.

3.4.4 Módulo dinámico (AASHTO T342-11)

El módulo dinámico es el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal. [10]

El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (haverseno) a un espécimen de concreto asfáltico, a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen son medidos y usados para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase como se muestra en Figura 4

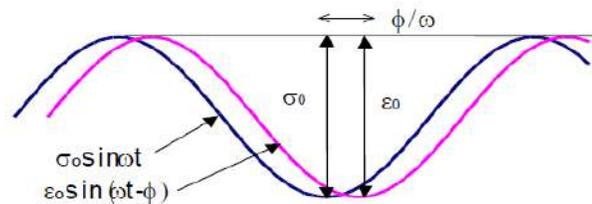


Figura 4. Módulo dinámico complejo [10]

El módulo dinámico complejo se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)}$$

2

Donde: σ_0 = esfuerzo máximo, ε_0 = deformación máxima, ϕ = ángulo de fase en grados, ω = velocidad angular y t = tiempo en segundos.

De acuerdo con la norma AASHTO T 342-11 “Método de ensayo para determinación del Módulo dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA)”, se aplica una carga cíclica sinusoidal a un espécimen de concreto asfáltico, de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, a las temperaturas de -10, 4, 20, 37 y 54°C y frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas. Cada espécimen es ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga, comenzando de la temperatura más baja a la más alta, y de la frecuencia más alta a la más baja. [11]

Una vez completada la prueba y analizados los resultados de las réplicas en cuanto a calidad y consistencia, los datos del módulo dinámico se desplazan utilizando el principio de superposición de tiempo y temperatura para construir una curva maestra a una temperatura de referencia. El principio de superposición tiempo-temperatura es una forma de relacionar los valores de módulo de un material obtenidos a diferentes temperaturas y frecuencias.

3.4.5 Resistencia a la fatiga (AASHTO T-321)

En México se ha utilizado el ensaye de la Viga a Flexión en Cuatro Puntos, el cual consiste en someter un espécimen prismático a esfuerzos de flexión a una velocidad de aplicación de carga de diez ciclos por segundo (10Hz) en una cámara de temperatura controlada a 20°C

Durante el ensayo de Fatiga se distinguen tres etapas. En la primera etapa (primeros ciclos de carga) se tiene una disminución súbita de la integridad del material en términos de su módulo de rigidez a flexión. En la segunda etapa dicho módulo tiende a seguir un comportamiento lineal; en esta etapa se presenta el fenómeno de Fatiga. En la tercera etapa se tiene nuevamente una caída abrupta del módulo de rigidez en la cual se presenta la interconexión y propagación de grietas como se muestra en la Figura 5.

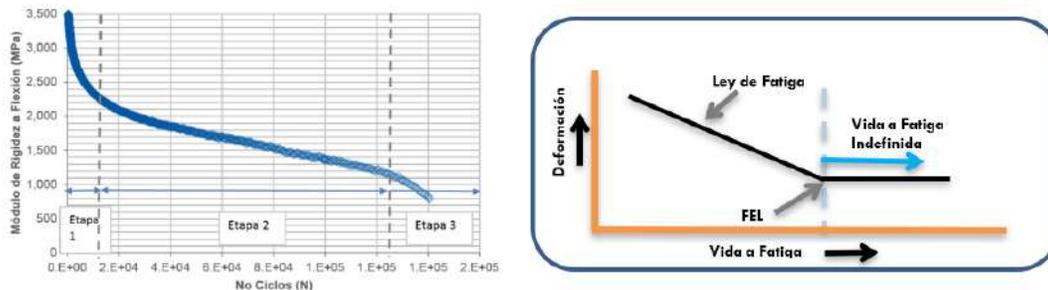


Figura 5. Evaluación del módulo de rigidez a flexión en el ensaye de fatiga y esquema de la ley de fatiga

La Ley de Fatiga se representa mediante la curva de Whöler, la cual define la relación que existe entre el nivel de sollicitación y el número de ciclos a la falla (Nf). En términos prácticos la Ley de Fatiga proporciona información del número de repeticiones que resiste la mezcla asfáltica antes de llegar a su falla a distintos niveles de deformaciones producidos por el paso de vehículos de distintos pesos. El Límite de Resistencia a Fatiga (FEL, por sus siglas en inglés), se define como el nivel de deformación debajo del cual no ocurre el daño por fatiga.

4 Análisis y discusión de resultado

4.1 Densificación de la mezcla

Se fabricaron dos especímenes con una masa de 4500 gramos, para cada contenido de emulsión evaluado en este trabajo y fueron compactados a 100 giros usando las temperaturas de mezclado y compactación y tiempo de curado descritos en el apartado 3.3 para verificar el porcentaje de compactación alcanzado.

Para los contenidos de 2.5% y 3.0% de emulsión se alcanzaron vacíos de aire dentro del rango de 3-8% propuesto en la norma N·CMT·4·02·003/21 de la SICT para bases asfálticas (bases negras). Los porcentajes de vacíos especificados en la normativa se cumplen con contenidos de emulsión superiores al 2.0%. Los datos se presentan en la Tabla 2



Tabla 2. Densificación de la mezcla a 100 giros.

Contenido de emulsión (%)	Altura @ 100 giros (mm)	Gmm	Gmb	% de compactación	%Va	%Va. Promedio
2.0	117.8	2.391	2.179	91.1	8.9	9.1
2.0	118.7		2.163	90.8	9.2	
2.5	117.7	2.375	2.201	92.7	7.3	7.3
2.5	117.5		2.207	92.8	7.2	
3.0	117	2.359	2.219	94.1	5.9	6.0
3.0	117.8		2.210	93.9	6.1	

4.2 Evaluación de desempeño primera etapa y selección del contenido óptimo de emulsión asfáltica

4.2.1 Susceptibilidad al daño por humedad TSR

Los resultados obtenidos para la prueba de TSR se muestran en la Tabla 3. En México de acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 para el Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño se especifica un valor mínimo de TSR = 80%. Sin embargo, no existe una especificación para mezclas recicladas. En España de acuerdo con la orden circular 8/2001 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos se especifica un valor de TSR mínimo de 75% [12].

Los valores de TSR obtenidos en este estudio oscilaron entre 77% a 82%, en la Tabla 3 se muestran los valores promedio obtenidos para el esfuerzo a tensión indirecta en seco y húmedo para cada uno de los contenidos de emulsión asfáltica evaluados.

Se realizó un análisis estadístico por el método de Tukey con un nivel de confianza del 95% para los esfuerzos en seco y esfuerzos en húmedo de los tres grupos de mezcla evaluados. Los resultados se muestran en la Tabla 3 y Figura 6. De acuerdo con análisis estadístico obtenido para cada uno de los contenidos de emulsión utilizado se observa que no existe una diferencia estadística significativa en la resistencia a la tensión indirecta en seco y húmedo de las tres mezclas evaluadas.

Tabla 3. Análisis de variación estadístico Tukey al 95% de confianza para los esfuerzos en seco y húmedo de las evaluaciones de TSR a diferentes contenidos de emulsión.

ID espécimen	Nº	Promedio esfuerzo seco	Grupo estadístico	Promedio esfuerzo húmedo	Grupo estadístico	TSR (%)
EARA-2P-2.0%	3	786.7	A	615.67	A	82
EARA-2P-2.5%	3	749	A	605.7	A	77
EARA-2P-3.0%	3	718.3	A	561.7	A	78

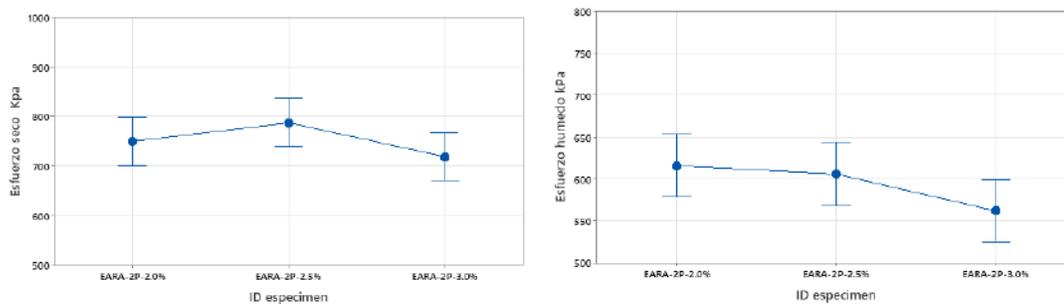
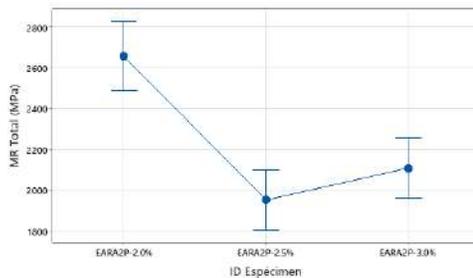


Figura 6. Resultados promedio del esfuerzo en seco y resultados promedio del esfuerzo en húmedo

4.2.2 Módulo resiliente

El comportamiento del M_{rt} en función del contenido de emulsión utilizado en la mezcla se presenta en la Figura 7. En el módulo resiliente para el contenido del 2.0% de emulsión se obtiene la mayor rigidez de la mezcla siendo estadísticamente superior a la resistencia para los contenidos de 2.5% y 3.0%.

Para los contenidos de 2.5% y 3.0% de emulsión en la mezcla se obtuvieron valores promedio de M_{rt} estadísticamente iguales (grupo estadístico B) de acuerdo con el análisis Anova realizado.



ID Espécimen	N	Promedio	Grupo estadístico
EARA2P-2%	3	2658	A
EARA2P-2.5%	4	1950.8	B
EARA2P-3.0%	8	2108	B

Figura 7. Resultados promedio y análisis estadístico de módulo resiliente.

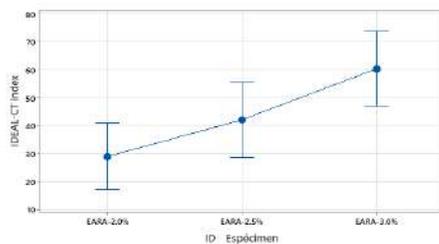
4.2.3 Susceptibilidad al agrietamiento

Una parte importante del diseño de mezclas asfálticas con uso de RAP y aún más a una tasa del 100%, es la reactivación del asfalto envejecido existente, para brindar a la mezcla un comportamiento balanceado en rigidez y flexibilidad similar al de una mezcla asfáltica en caliente convencional con material 100% virgen.

La emulsión asfáltica modificada, utilizada como ligante tiene la función principal de reestablecer parte de las propiedades del asfalto del RAP.

En la Figura 8 se pueden observar los resultados promedio de Index-CT obtenidos para los tres contenidos de emulsión asfáltica utilizados en la mezcla, donde la tendencia mostrada es que, a mayor contenido de emulsión, mayor es el valor de Index-CT.

Para el contenido de 2.0% se obtuvo un Index-CT de 28.95 grupo estadístico B, para 2.5% se obtuvo un Index-CT de 42.09 grupo estadístico AB y para el contenido de 3.0% se obtuvo un Index-CT de 60.39 grupo estadístico A. Siendo superior estadísticamente la mezcla fabricada con 3.0% de emulsión. El departamento de transporte de Alabama (ALDOT) de acuerdo con un estudio de pruebas de agrietamiento para el diseño balanceado de mezclas en caliente con RAP, desarrollado en la pista de pruebas del National Center for Asphalt Technology (NCAT) especificó un valor de Index-CT mínimo de 50.[13]



ID Espécimen	N	Promedio	StDev	Grupo estadístico
EARA-3.0%	4	60.39	19.16	A
EARA-2.5%	4	42.09	6.43	AB
EARA-2%	5	28.95	7.26	B

Figura 8. Resultados y análisis estadístico de Index-CT

4.3 Evaluación del desempeño segunda etapa

4.3.1 Módulo dinámico

Para la construcción de la curva maestra del módulo dinámico se realizó la evaluación puntual de módulo dinámico a las temperaturas de -10, 4, 20, 37 y 54°C y frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas.

En la Figura 9 a) y 10 b) podemos observar el comportamiento del módulo dinámico en función de la frecuencia y la temperatura mediante las curvas Isotermas e Isocriñas respectivamente.

Mediante las curvas isotermas se puede determinar la susceptibilidad cinética del material asfáltico, esto es, la variación en el valor del módulo con respecto a la velocidad de sollicitación [14]. De manera general a mayor temperatura y menor frecuencia de aplicación de carga el módulo dinámico será más bajo.

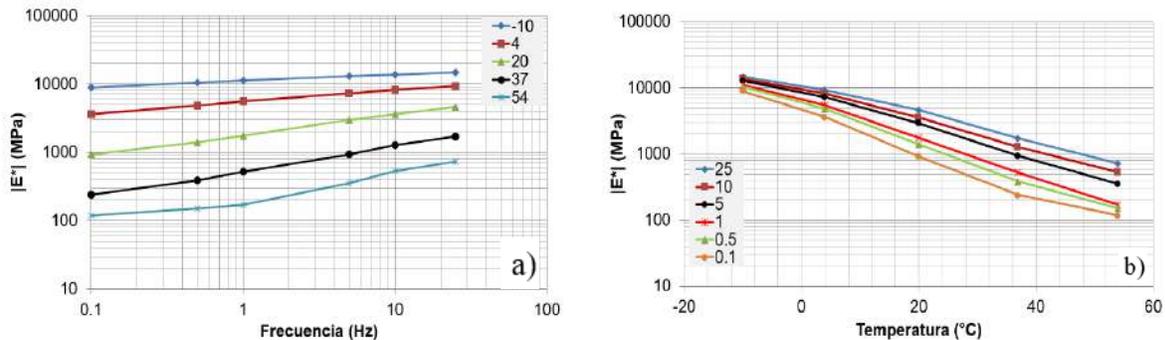


Figura 9. a) Curvas Isotermas b) Curvas Isocriñas

La curva maestra se definió a una temperatura de referencia de 20°C usando el principio de superposición tiempo-temperatura. Los datos del módulo dinámico de diferentes temperaturas se desplazan horizontalmente en el gráfico de módulo frente a la frecuencia para formar una sola curva continua. Una vez que se realizan los cambios, el efecto de la temperatura y la frecuencia de carga se representa mediante una frecuencia reducida, que representa los efectos de la temperatura y la frecuencia simultáneamente.

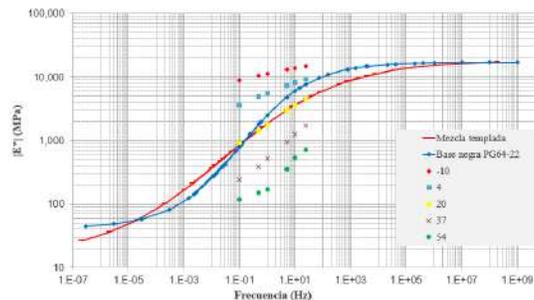


Figura 10. Curva maestra de la mezcla templada vs Mezcla en caliente convencional.

En la Figura 10 se muestra la curva maestra de la mezcla templada en la línea color rojo y la curva maestra de la mezcla en caliente convencional de control en color azul.

Se puede observar que los valores de módulo dinámico en ambas curvas en la zona que corresponde a bajas temperaturas y/o frecuencias altas son similares, en la zona media del gráfico las curvas se cruzan y para la zona que corresponde a temperaturas de 37 y 54°C C (temperaturas en el



rango de funcionamiento de un pavimento) y/o frecuencias bajas la curva maestra de la mezcla templada obtuvo valores de módulo dinámico más altos.

4.3.2 Resistencia a la fatiga.

Para la evaluación de la resistencia a la fatiga por medio de la viga a flexión de 4 puntos, se utilizaron niveles de deformación de 500, 600 y 650 $\mu\epsilon$, evaluando cada nivel por duplicando y obteniendo el número de repeticiones a la falla de acuerdo con el criterio de falla clásico del 50% de reducción del módulo de rigidez inicial. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la evaluación de la resistencia a la fatiga de la mezcla templada.

Espécimen	Deformación ($\mu\epsilon$)	Esfuerzo inicial (KPa)	Rigidez Inicial (MPa)	Ciclos a la falla, Nf
EARA 2P_650	650	1,718	2,643	63,095
EARA 2P_650	650	1,670	2,573	79,204
EARA 2P_600	600	1,636	2,729	501,187
EARA 2P_600	600	1,494	2,490	653,130
7EARA 2P_500	500	1,370	2,740	3,475,545
EARA 2P_500	500	1,393	2,782	4,178,592

En la Figura 11 se presenta la ley de fatiga de la mezcla templada con 3% de emulsión en color rojo vs la ley de fatiga de la mezcla en caliente convencional de control en color azul. Se puede observar que los niveles de deformación requeridos para obtener números de repeticiones a la falla similares durante la evaluación fueron más altos para la mezcla templada que los requeridos para la mezcla control, además la pendiente que muestra la ley de fatiga de la mezcla templada es menor, indicando una mayor resistencia a la fatiga que la mezcla convencional de control.

De acuerdo con el procedimiento descrito en reporte N° 646 de NCHRP, se determinó el valor de límite de resistencia a la fatiga (FEL) para cada una de las leyes de fatiga, que en términos prácticos se entiende como el nivel de deformación por debajo del cuál la mezcla no falla. Obteniéndose un valor de 385 $\mu\epsilon$ para la mezcla templada y 137 $\mu\epsilon$ para la mezcla asfáltica en caliente convencional (base negra).

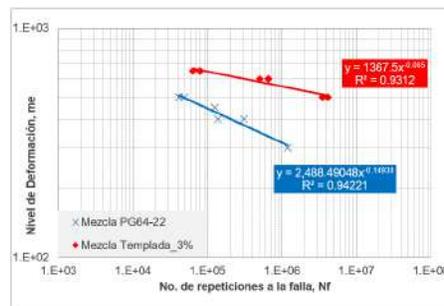


Figura 11. Ley de fatiga mezcla templada vs Ley de fatiga mezcla en caliente convencional

5 Conclusiones

- Se logró mezclar y compactar la mezcla templada a menores temperaturas que la mezcla en caliente de control a altas tasas de utilización de RAP, logrando un equilibrio entre las propiedades de rigidez y flexibilidad de la mezcla.



- La mezcla templada con un contenido mayor a 2.5% de emulsión logró cumplir con el rango de vacíos especificado para una base asfáltica (base negra).
- La mezcla templada alcanzó un valor de energía de fractura Index-CT superior a 50 que es el valor especificado por el DOT de Alabama para mezclas en caliente con RAP. En México no se tiene especificación.
- La mezcla templada con emulsión asfáltica tuvo un comportamiento similar de módulo dinámico en la curva maestra a temperaturas intermedias y frecuencias bajas.
- La mezcla templada con emulsión asfáltica tuvo un comportamiento a fatiga superior al de la mezcla asfáltica convencional de control (base negra) y obtuvo un valor de FEL mayor al doble del especificado para proyectos en México.
- La mezcla asfáltica templada cumple con los requisitos de calidad de una mezcla para capa de base negra de acuerdo con la norma N·CMT·4·02·003/21 de la SICT.

6 Trabajos futuros

Se buscará un tramo de prueba para evaluar la tecnología, su desempeño, durabilidad y beneficios medioambientales

7 Referencias

- [1] Merseguer J.V., Molina M. V., Nuñez-Cacho U.P. (2021), Economía Circular: Fundamentos y Aplicaciones. Thomson Reuters Aranzadi, Primera Edición, España.
- [2] Korhonen, J., Honkasalo, A. & Sepala, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, <https://doi.org/10.1016/j.ecole-con.2017.06.041>
- [3] Lorente-González & Vence X. (2020). *Resources Conservation & Recycling*, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105033>.
- [4] European Environment Agency. Environmental indicator report 2016. In support to the monitoring of the 7th Environment Action Programme.
- [5] Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art, Martins Zaumanis & Rajib B. Mallick
- [6] NCAT, (2013), Report 13-08 Alternative methods for increasing the durability of RAP mixtures. Auburn University.
- [7] Mezclas templadas con emulsión bituminosa. Asociación Técnica de emulsiones Bituminosas (ATEB), España, 2014
- [8] Galehouse., J.C.a.L., Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements. *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation*, Newport Beach CA., 2010. Chapter 1: Paper 65: p. 27
- [9] AASHTO PP 105-20 (2022). Standard Practice for Balanced Design of Asphalt Mixtures.
- [10] Leiva, F. Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas. Desarrollo de curvas maestras. (primera parte). LANAMME.
- [11] Delgado, H., Gómez, J.A., Flores, M. (2017) Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México. Pt # 507. IMT.
- [12] Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2001). Anejo de la orden circular 8/2001 sobre reciclado de firmes. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras (PG-4)
- [13] NCAT, A. U. (2021). National Center for Asphalt Technology. Implementation Spotlight: Balanced Mix Design for Alabama Counties. Retrieved from: <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2021-spring/implementation.html>
- [14] Delgado, H. (2013, Abril - Junio). Lo complejo del módulo complejo: principio de equivalencia tiempo - temperatura (tercera parte). *Asfáltica*(34), 42-46