



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ANÁLISIS DE MÉTODOS QUÍMICO-REOLÓGICOS PARA LA DOSIFICACIÓN DE ADITIVO REJUVENECEDOR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Daniela Bocanegra Martínez¹, Leonardo Ambrosio Ochoa Ambriz²,
Álvaro Gutiérrez Muñiz³, Raymundo Benítez López⁴

¹ Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, dbocanegra@kao.com

² Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, lochoa@kao.com

³ Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, agutierrez@kao.com

⁴ Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México, rbenitez@kao.com

Resumen

El pavimento asfáltico recuperado (RAP) es un material que se transforma física y químicamente debido al proceso de envejecimiento. El uso de aditivos rejuvenecedores ha sido una alternativa eficiente para restaurar ciertas propiedades del RAP, sin embargo, aún no se cuenta con una metodología clara y bien definida para su dosificación en mezclas asfálticas.

En este estudio se utilizó la espectroscopía infrarroja (FTIR) y métodos reológicos para investigar el efecto del rejuvenecedor en las propiedades químicas y reológicas del asfalto, y así, restaurar el asfalto envejecido (combinación 70 % virgen-30 % envejecido) a la condición del asfalto virgen, según el parámetro representativo de cada ensayo. Se consideraron metodologías que evalúan el comportamiento del asfalto ante el fenómeno de agrietamiento, ya que es el principal deterioro que pueden presentar las mezclas con RAP.

Se utilizó el FTIR para cuantificar los cambios en los grupos funcionales e igualar el índice de envejecimiento. En las pruebas reológicas, se observó la evolución del grado de desempeño, los parámetros Glover-Rowe y la energía de fractura.

Las dosis obtenidas de cada metodología a nivel asfalto se validaron a partir de ensayos de energía de fractura en viga semicircular y ahuellamiento en rueda cargada de Hamburgo para comparar el desempeño de las mezclas recicladas con incorporación de aditivo rejuvenecedor.

Los resultados demuestran que las mezclas recicladas en caliente que incluyen aditivo rejuvenecedor dosificado de manera adecuada pueden sufrir menor degradación y su desempeño no se ve comprometido.

Palabras Clave: rejuvenecedores, dosificación, RAP, desempeño

1 Introducción

El uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) ha ganado reconocimiento en la industria de la pavimentación como un enfoque sostenible prometedor para reducir costos de fabricación de mezcla, reducción de consumo de energía, así como ahorro en el uso de recursos naturales. Sin embargo, la principal preocupación respecto a la incorporación del RAP en mezclas asfálticas radica en las propiedades del asfalto envejecido presente en el material recuperado, ya que generalmente presenta una rigidez elevada, lo que resulta en mezclas sensibles al agrietamiento y con baja trabajabilidad [1]. Con el fin de maximizar la incorporación de RAP en mezclas asfálticas en caliente, la solución más prometedor y estudiada se refiere a la utilización de aditivos rejuvenecedores. A pesar de que los proveedores de aditivo rejuvenecedor suelen recomendar un rango para la dosis, la cantidad que se añade a una mezcla depende del nivel de envejecimiento del asfalto presente en el RAP, así como de las propiedades del asfalto base y el criterio seleccionado para la determinación de la dosis óptima de rejuvenecedor. Por lo anterior, el



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

contenido de aditivo debe determinarse cuidadosamente, ya que una dosis inadecuada de aditivo puede provocar una falta de activación del asfalto envejecido del RAP y generar problemas de agrietamiento en la mezcla o, por otro lado, un exceso de aditivo podría llevar a un detrimento en la resistencia a la deformación permanente [2].

Lo anterior nos llevó a investigar sobre diferentes formas de dosificación del aditivo, por ejemplo, algunas investigaciones consideran la restauración de propiedades físicas de una mezcla de asfaltos hasta conseguir las mismas características que el asfalto virgen. A. Ongel y M. Hugener. (2015) consideran la selección de la dosis utilizando los valores de penetración de los asfaltos estudiados; M. Chen *et. al* (2014) se basan en otros parámetros como la viscosidad, punto de reblandecimiento y ductilidad o en los últimos reportes del NCAT (National Center for Asphalt Technology) en donde exponen que la dosis de aditivo puede determinarse al restablecer las temperaturas del grado PG del asfalto virgen (NCHRP, 2014). Estos y otros estudios demuestran que es indispensable la correcta selección del índice reológico, físico o químico del asfalto para obtener una dosis óptima de aditivo rejuvenecedor. Por tal motivo, en esta investigación se toman en cuenta diferentes criterios de optimización, considerando el tipo de deterioro predominante en las mezclas recicladas, el agrietamiento.

2. Objetivos

–Proponer una metodología para la dosificación de aditivo rejuvenecedor en el diseño de mezclas asfálticas en caliente que incorporan RAP mediante la restauración de propiedades específicas (reológicas y químicas) del asfalto envejecido.

Con este fin se definieron los siguientes objetivos particulares:

- Identificación de las propiedades adecuadas a utilizarse como objetivo para la optimización de la dosificación de aditivo rejuvenecedor.
- Comparar las dosis óptimas de aditivo rejuvenecedor obtenidas mediante diferentes índices reológicos y químicos.
- Evaluar la capacidad del aditivo para restaurar las propiedades tanto del asfalto envejecido como de las mezclas con alta tasa de RAP.

3 Métodos y resultados

Para el estudio se utilizaron materiales provenientes de bancos de agregados localizados en el estado de Jalisco, material reciclado obtenido de los trabajos de reparación de la carretera Maravatío-Zapotlanejo y cemento asfáltico de la refinería de Salamanca.

3.1 Cemento asfáltico virgen y pavimento asfáltico recuperado (RAP)

El cemento asfáltico base utilizado fue un EKBÉ® PG 64-22, de acuerdo con su clasificación por desempeño, cuya temperatura crítica de falla se presenta en la Tabla 1. Se seleccionó una única fuente de RAP, de la cual se obtuvo el material necesario para los experimentos. Las muestras de RAP se obtuvieron de trabajos de fresado que contemplan material de carpeta y base asfáltica, que fue homogeneizado y caracterizado de acuerdo con los estándares que se especifican en la Tabla 1. El asfalto de RAP se obtuvo a partir de un proceso de extracción centrífuga y destilación acorde con las normas ASTM2172 *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures* y ASTM D5404 *Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator*, respectivamente, y se determinaron las propiedades reológicas del asfalto envejecido en el reómetro de corte dinámico.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 1. Características del asfalto base y pavimento asfáltico recuperado (RAP).

| CEMENTO ASFÁLTICO BASE | | | | | | | | | | |
|--|------|------|-------------------------|------|------|-------|-------|------------------|--------|--------|
| Reómetro de corte dinámico (DSR) - AASHTO T315 Condición original | | | | | | | | | | |
| T. crítica de falla [°C]: | | | | | | | | 66.67 | | |
| MATERIAL RAP | | | | | | | | | | |
| Propiedad | | | Método de ensayo | | | | | Resultado | | |
| Contenido de asfalto, % | | | ASTM D2172 | | | | | 6 | | |
| Distribución granulométrica - AASHTO T27 | | | | | | | | | | |
| Designación | 3/4" | 1/2" | 3/8" | No.4 | No.8 | No.16 | No.30 | No.50 | No.100 | No.200 |
| % Pasa | 100 | 94.2 | 86 | 52.6 | 36.6 | 27.2 | 18.3 | 13.6 | 9.5 | 5.6 |
| Reómetro de corte dinámico (DSR) - AASHTO T315 Condición original | | | | | | | | | | |
| T. crítica de falla [°C]: | | | | | | | | 137.89 | | |

Debido a que el proceso de extracción del asfalto de RAP es un tanto complejo para obtener muestras significativas, en este trabajo se fabricó un asfalto envejecido a largo plazo, cuya condición reológica fuera análoga a la del asfalto obtenido de RAP. Este procedimiento consistió en someter el asfalto base a los procesos de envejecimiento en laboratorio: RTFO y PAV. En la Tabla 2 se presentan las temperaturas críticas de falla del asfalto en los diferentes estados de envejecimiento y se observa que la condición que más se asemeja al asfalto de RAP es la que corresponde al cemento asfáltico sometido a cuatro ciclos de envejecimiento en el horno PAV, por lo cual, se considera que la condición del asfalto extraído de RAP será equivalente a la condición de aquel envejecido en laboratorio. En adelante se hará referencia a este último como *asfalto RAP'*.

Tabla 2. Temperatura crítica de falla del asfalto base y a diferentes condiciones de envejecimiento.

| Condición de envejecimiento | Temperatura crítica de falla (°C) |
|------------------------------------|--|
| Asfalto base (original) | 66.67 |
| RTFO | 74.24 |
| PAV | 90.27 |
| II PAV | 102.70 |
| III PAV | 123.52 |
| IV PAV = asfalto RAP' | 144.10 |
| Asfalto extraído de RAP | 137.89 |

3.2 Agregado pétreo

Para esta investigación se utilizaron agregados pétreos de naturaleza basáltica, 100 % producto de trituración que consisten en arena de cono y grava de 3/4". Los agregados minerales cumplen con todas las características físicas y resistentes para ser considerados en el diseño de mezclas de alto desempeño.

3.3 Aditivo rejuvenecedor y procedimiento de incorporación en el cemento asfáltico

En este estudio se utilizó un aditivo líquido que es un aceite derivado de amina grasa, un material orgánico capaz de alterar la viscosidad del asfalto envejecido presente en el RAP, mejorar la trabajabilidad de la mezcla y ralentizar el endurecimiento del asfalto, es decir, funciona como un rejuvenecedor, lo cual favorece a alcanzar las características óptimas de la mezcla reciclada.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

La preparación de las mezclas de aglutinantes asfálticos con aditivo rejuvenecedor se realizó siguiendo los pasos descritos a continuación:

- I. El cemento asfáltico base se precalentó a 150° C hasta obtener una consistencia fluida y se vertió en un recipiente la cantidad correspondiente al 70 % del total de la mezcla (asfalto base más asfalto RAP’).
- II. Se agregó la dosis necesaria de aditivo rejuvenecedor (de acuerdo con cada método analizado) al asfalto base. Se colocó sobre una plancha a 150° C y se agitó manualmente utilizando una varilla durante un minuto. La cantidad de aditivo que se añade es respecto al peso del asfalto base.
- III. A continuación, se añadió el asfalto RAP’ previamente calentado en cantidad correspondiente al 30 % respecto al peso total de la mezcla de asfaltos (base más asfalto RAP’) y se llevó nuevamente a agitación manual durante aproximadamente cinco minutos, manteniendo la temperatura de 150° C para asegurar que se mezclaran adecuadamente.
- IV. Por último, se colocó la mezcla de asfaltos en el horno por cinco minutos para la preparación de las muestras.

Es recomendable realizar los ensayos de ligante asfáltico en las mezclas inmediatamente después de su preparación para evitar calentamiento adicional que podría provocar un mayor envejecimiento y producir una condición diferente a la que se desea estudiar.

3.4 Métodos de optimización de aditivo rejuvenecedor

En esta investigación, la dosis de aditivo rejuvenecedor (en peso del asfalto base) se optimiza cuando la mezcla (70 % asfalto base y 30% asfalto RAP’) alcanza una propiedad reológica o química similar a la del asfalto base. Para este propósito, se seleccionaron diferentes parámetros relacionados con el fenómeno de agrietamiento del cemento asfáltico por tres razones: 1) el agrietamiento es el principal deterioro que presentan las mezclas asfálticas recicladas debido al asfalto envejecido presente en el RAP, 2) fenómenos relacionados con agrietamiento (fatiga y agrietamiento térmico) se deben entre 60 y 80 % al efecto del cemento asfáltico en la mezcla de acuerdo con el Strategic Highway Research Program (1994), y 3) generalmente la optimización de rejuvenecedor se hace directamente en la mezcla asfáltica una vez que se evalúan sus propiedades mecánicas, sin embargo, este proceso puede resultar muy largo y además consume grandes cantidades de material para lograr un diseño adecuado.

Por ese motivo, en esta investigación se propone realizar el proceso de optimización de la dosis de aditivo a nivel asfalto, utilizando la mezcla de asfaltos que represente la proporción de cemento asfáltico virgen (de aportación) y asfalto de RAP en la mezcla asfáltica, buscando que fueran métodos representativos, cuyo procedimiento fuese sencillo, aplicable y con tiempos de ensayo reducidos para agilizar el proceso de diseño de una mezcla asfáltica reciclada.

Los índices reológicos y químicos elegidos como criterios para la determinación de la dosis óptima de aditivo rejuvenecedor son: metodología propuesta en el reporte No. 927 del NCHRP, donde se incluyen implícitamente las cartas de mezclado, parámetro Glover-Rowe determinado a partir de curvas maestras elaboradas a cinco temperaturas de prueba, energía de fractura obtenida de la curva fuerza-desplazamiento de un barrido de deformación en un ensayo de análisis de agrietamiento en el cemento asfáltico, y el índice de envejecimiento basado en el nivel de variación del grupo carbonilo, obtenido de la prueba de espectroscopía infrarroja. Como parámetro adicional, se eligió el ensayo de penetración en el cemento asfáltico, una prueba física utilizada principalmente en Europa para la dosificación de aditivo rejuvenecedor.

Los procesos de optimización seguidos en este estudio buscan que las mezclas de ligante rejuvenecidas preparadas con la dosificación óptima determinada cumplirán o superarán los requisitos reológicos/químicos del asfalto base que se utilice.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3.4.1 Dosis inicial de rejuvenecedor: Formulación propuesta en el reporte No. 927 NCHRP

El programa de investigación de carreteras desarrolló una serie de formulaciones con las cuales es posible obtener la dosis inicial de aditivo rejuvenecedor, que tiene como propósito restaurar las propiedades del asfalto envejecido. Es decir, con la dosis de aditivo rejuvenecedor obtenida se pretende alcanzar el grado de desempeño del asfalto base una vez que se combina con el cemento asfáltico proveniente del RAP, como se proponía anteriormente con el método consolidado conocido como cartas de mezclado, para estimar el desempeño de una muestra de ligante mediante regresión lineal a partir del porcentaje de RAP, el PG crítico del asfalto extraído de RAP y el PG crítico del ligante mezclado.

A continuación, se presentan las fórmulas para la obtención de la dosis inicial de aditivo rejuvenecedor.

$$PGH_{Blend} = (RAP_{BR} * PGH_{RAP}) + (B_{BR} * PGH_{Base}) \quad (1)$$

Donde:

PGH_{Blend} : Alta temperatura crítica de falla del asfalto en la mezcla reciclada (teórica)

RAP_{BR} : relación de asfalto oxidado respecto al asfalto total en la mezcla reciclada calculado como:

$$RAP_{BR} = (\%RAP_{AC} * \%RAP) / (100 * AC_{TOTAL\ MEZCLA}) \quad (2)$$

PGH_{RAP} : Alta temperatura crítica de falla del asfalto extraído del RAP

B_{BR} : proporción de asfalto nuevo en la mezcla reciclada calculado como:

$$B_{BR} = (1 - RAP_{BR}) \quad (3)$$

PGH_{Base} : temperatura crítica de falla alta del asfalto base

$$\% \text{ Inicial de aditivo rejuvenecedor} = (PG_{Blend} - PGH_{Target}) / (EF_{AR}) \quad (4)$$

Donde:

PG_{Blend} : definido anteriormente,

PGH_{Target} : temperatura crítica de falla alta del asfalto deseado en el proyecto

EF_{AR} : Efectividad del aditivo rejuvenecedor que se calcula como:

$$EF_{AR} = \frac{(T_{C.A.Base} - T_{CR})}{\text{Porcentaje de rejuvenecedor añadido}} \quad (5)$$

Donde:

$T_{C.A.Base}$: Alta temperatura crítica de falla del asfalto base

T_{CR} : Alta temperatura crítica de falla del asfalto base con aditivo rejuvenecedor

De acuerdo con las características de los materiales utilizados, para esta metodología se obtuvo el siguiente porcentaje de aditivo recomendado para la fabricación de mezclas con 30% de RAP:

$$\% \text{ Inicial de aditivo rejuvenecedor} = (89.158 - 66.67) / (1.61) = \mathbf{14 \%}$$

3.4.2 Parámetro Glover-Rowe

El parámetro Glover-Rowe (G-R) se empleó para valorar la durabilidad y propensión al agrietamiento de los ligantes con y sin rejuvenecedor. Para su obtención, se calculó mediante la ecuación $|G^*| \cdot (\cos\delta)^2 / \sin\delta$, fue necesario monitorear las propiedades viscoelásticas lineales de módulo complejo de corte ($|G^*|$) y ángulo de fase (δ) a partir de un barrido de frecuencias y temperaturas empleando un reómetro de corte dinámico. El comportamiento mecánico global fue capturado mediante la función de distribución CAM y con el principio de superposición tiempo-temperatura (PsTT), se ajustaron los datos del barrido de frecuencia isotérmico a una curva única de referencia de 15° C (curva maestra), tal como se muestra en la Figura 1.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

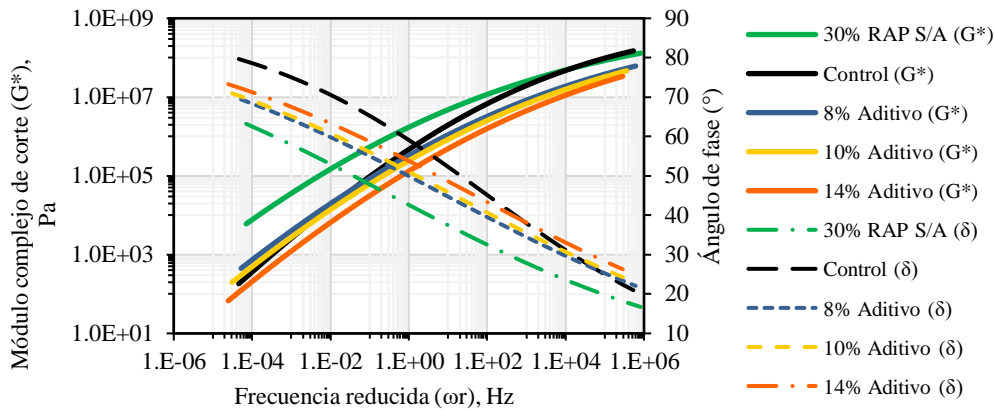


Figura 1. Curva maestra ajustada a una temperatura de 15° C.

La curva maestra anterior nos muestra la relación de rigidez de los asfaltos evaluados en un amplio espectro de frecuencias. No obstante, para fines de esta investigación nos centraremos en el valor de módulo complejo de corte ($|G^*|$) y ángulo de fase (δ) a la frecuencia de 0.005 rad/s. Los datos anteriores nos permiten utilizar la herramienta de análisis conocida como diagrama de espacio negro y el cálculo de parámetro Glover-Rowe. En este diagrama de interacción reológico podemos rastrear el impacto del aditivo en la restauración de las propiedades mecánicas, tal como se aprecia en la Figura 2.

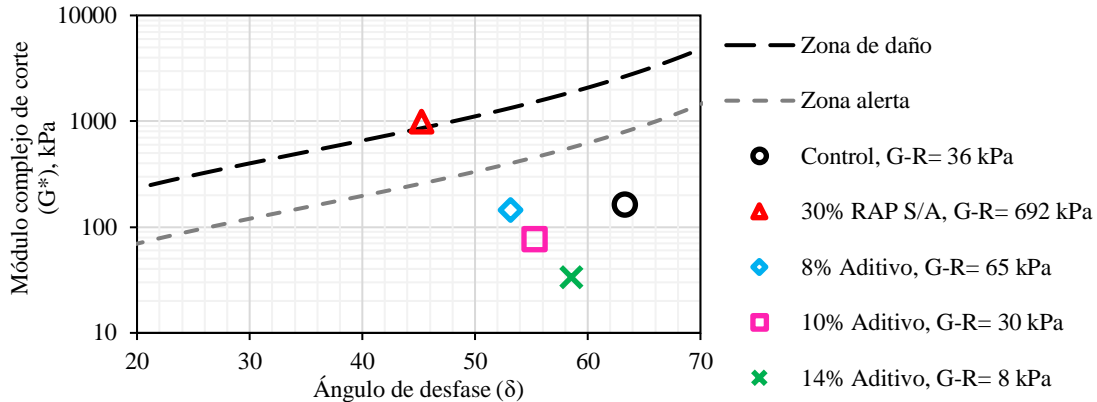


Figura 2. Diagrama de espacio negro (G^* vs δ).

A partir del diagrama anterior es posible observar la disminución del módulo complejo de corte (G^*) y el incremento en el ángulo de fase (δ) conforme la participación de aditivo crece en el sistema. Lo anterior indica la recuperación del balance entre la componente elástica y viscosa, lo cual, de acuerdo con esta técnica de análisis, se relaciona con mejoras en las propiedades de relajación, disipación de esfuerzos de tensión, ductilidad y adhesión. Como era de esperarse, la mezcla 70 % asfalto nuevo y 30 % RAP se encuentra en la zona de daño debido a la fragilidad conferida por el asfalto oxidado. Por otro lado, la incorporación de 10 % de aditivo ofreció características similares a la respuesta en el parámetro G-R obtenido en el asfalto de control, por lo que este porcentaje de aditivo fue seleccionado para la fabricación de mezclas asfálticas.

3.4.3 Potencial de fractura en el ligante asfáltico

Para esta investigación se ha propuesto el uso de un ensayo reológico que permite determinar el potencial de fractura del cemento asfáltico, cuyo método fue desarrollado por Gutiérrez Muñoz A. (2021). A través de este método de prueba es posible calcular la energía de fractura (G_f) obtenida de la curva fuerza-desplazamiento, parámetro principal que se tomará en cuenta para el



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

cálculo de la dosis de aditivo rejuvenecedor. Sin embargo, derivado de la misma curva, es posible obtener otras características relevantes como la pendiente (m) posterior al pico de carga máxima y el índice de flexibilidad (IF) para predecir la resistencia al agrietamiento del cemento asfáltico. El ensayo consiste en un barrido de deformación, la cual aumenta linealmente a una temperatura intermedia (para esta investigación se utilizó 20° C) y frecuencia constante (20 Hz).

En la Figura 3 se muestra la curva característica de fuerza vs. desplazamiento, y en la Tabla 3 se presentan los valores correspondientes a cada parámetro obtenido de la misma curva. Como se mencionó, el parámetro de referencia que se consideró para este método fue el área bajo la curva y, en segundo lugar, la pendiente después del pico máximo, para lo cual se ajustó una ecuación donde se iguala la energía de fractura G_f y se obtiene la mejor pendiente. Por lo tanto, el porcentaje de aditivo ideal para empatar la condición del asfalto base de acuerdo con este método fue de 5 %.

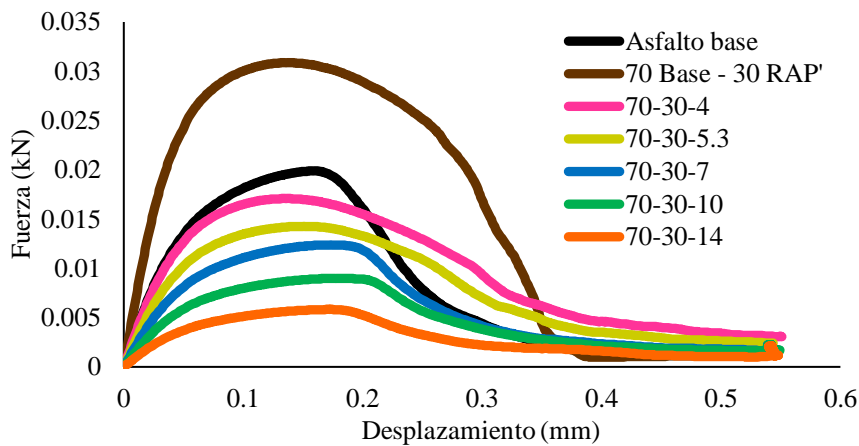


Figura 3. Curva fuerza-desplazamiento método de potencial de fractura en el ligante asfáltico.

Tabla 3. Parámetros de la curva fuerza-desplazamiento en el cemento asfáltico.

| % Aditivo | ID | IF | Wf | Gf (Joules/m ²) | Slope |
|---|------------------------|--------|--------|-----------------------------|-------|
| 0 | Asfalto base o control | 1.6178 | 0.0043 | 2155.59 | 0.133 |
| 0 | 70 Base – 30 RAP' | 1.7045 | 0.0082 | 4114.11 | 0.241 |
| 4 | 70-30-4 | 4.042 | 0.0052 | 2619.195 | 0.065 |
| 7 | 70-30-7 | 2.2917 | 0.0031 | 1545.09 | 0.067 |
| 10 | 70-30-10 | 2.5874 | 0.0024 | 1197.47 | 0.046 |
| 14 | 70-30-14 | 2.2626 | 0.0014 | 722.71 | 0.032 |
| Utilizando la ecuación ajustada: | | | | | |
| $G_f = -0.1149x^3 + 17.645x^2 - 466.74x + 4129.5 / Slope = -0.0003x^3 + 0.0082x^2 - 0.0697x + 0.2396$ | | | | | |
| 5 | 70-30-5 | 4.155 | 0.0043 | 2155.59 | 0.056 |

3.4.4 Índice de envejecimiento – Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

El proceso de oxidación del cemento asfáltico, visto desde el punto de vista químico, se refiere a la generación de grupos funcionales, que incluyen los ácidos carboxílicos y los sulfóxidos. Los enlaces químicos de los grupos carbonilo (C=O) y sulfóxido (S=O) pueden identificarse por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), mediante el análisis de las intensidades de absorción del infrarrojo y las vibraciones moleculares presentes en el material. La formación de grupos carbonilo y sulfóxido durante el proceso de envejecimiento afecta al endurecimiento del asfalto, lo que los convierte en indicadores fiables del envejecimiento. Con esta información es posible crear espectros como el que se observa en la Figura 4 que revelan los detalles de la estructura química del asfalto, esencial para comprender su



comportamiento. En los espectros, la vibración de estiramiento del C=O se define comúnmente como la banda alrededor del pico 1700 cm^{-1} , mientras que el área del grupo sulfóxido es la banda en torno a la longitud de onda 1030 cm^{-1} .

El análisis espectral se llevó a cabo utilizando el método de integración que tiene en cuenta el área situada por debajo del espectro de absorbancia en torno a un máximo de banda que comprende los grupos funcionales de interés, y se utilizó una línea base absoluta en un valor de absorbancia de cero.

Las integrales se calcularon como se indica en la siguiente ecuación:

$$I_i = \int_{w_{l,i}}^{w_{u,i}} a(w) dw \quad (6)$$

con $a(w)$ valor de absorbancia en el número de onda w , $w_{u,i}$ límite superior del número de onda para el grupo estructural i , $w_{l,i}$ límite inferior del número de onda para el grupo estructural i , I_i , área integrada a partir de la línea de base absoluta para el grupo estructural I_i .

Es importante mencionar que los límites de onda inferior y superior para cada grupo de interés no son absolutos y se producen alrededor de los picos mencionados y dependen completamente del material [7].

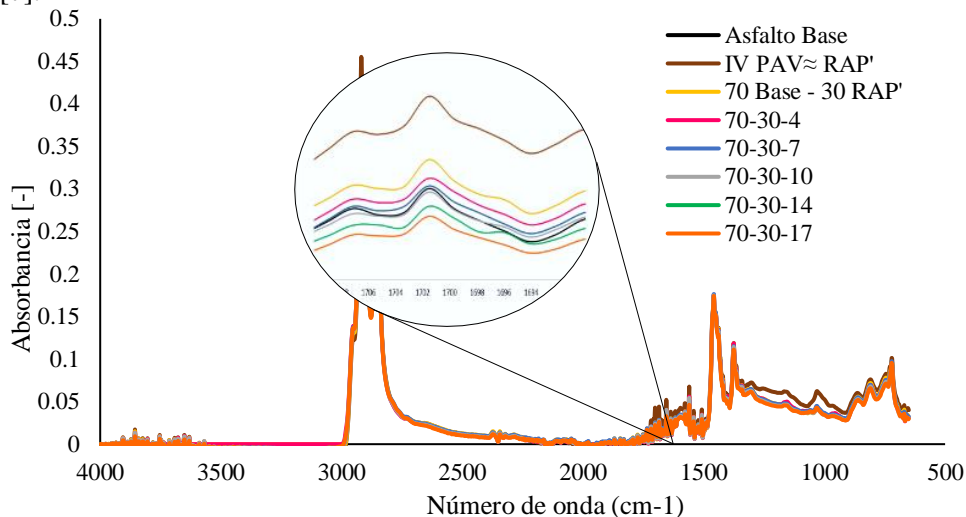


Figura 4. Espectros obtenidos del infrarrojo con detalle del grupo carbonilo.

Una vez calculadas las áreas correspondientes a cada grupo funcional, se calcularon los índices de envejecimiento tomando en cuenta únicamente el grupo carbonilo, ya que se ha encontrado en diferentes investigaciones que el comportamiento de este grupo funcional ante efecto de oxidación presenta menor coeficiente de variación. El índice de oxidación se refiere al aumento del grupo funcional (en este caso C=O) tomando como referencia el área correspondiente obtenida para el asfalto base, como se expresa en la ecuación 7.

$$\text{Índice de envejecimiento } (C = O) = \frac{(C = O \text{ Área})_i}{(C = O \text{ Área})_{\text{asfalto base}}} \quad (7)$$

Donde i representa el asfalto analizado que puede ser la mezcla de asfalto (70 % asfalto base y 30 % asfalto RAP') o el asfalto rejuvenecido con aditivo.

El objetivo, entonces, fue obtener un índice de oxidación igual a cero, que indicará una condición similar al asfalto base. Para lograr lo anterior se ajustó una ecuación a partir de las mediciones realizadas en las mezclas de asfaltos y utilizando diferentes dosis de aditivo. En la Tabla 4 se resumen los resultados de las áreas obtenidas para el grupo carbonilo y el índice de envejecimiento. Se observa que con 9 % de aditivo rejuvenecedor se alcanza un valor igual a cero,



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

lo que indica una condición equivalente al asfalto base, un material que no ha pasado por proceso de oxidación.

Tabla 4. Cálculo de la dosis de aditivo a partir de los parámetros de espectroscopía infrarroja.

| ID | % Aditivo | Área carbonilo | Índice de envejecimiento (C=O) |
|---|-----------|----------------|--------------------------------|
| <i>Asfalto base</i> | 0 | 0.7985 | 0.000 |
| <i>RAP'</i> | 0 | 1.3697 | 0.715 |
| <i>RAP</i> | 0 | 2.1609 | 1.706 |
| <i>70 Base-30RAP'</i> | 0 | 0.9787 | 0.226 |
| <i>70-30-4</i> | 4 | 0.8838 | 0.107 |
| <i>70-30-7</i> | 7 | 0.8279 | 0.037 |
| <i>70-30-10</i> | 10 | 0.7877 | -0.014 |
| <i>70-30-14</i> | 14 | 0.7194 | -0.099 |
| <i>70-30-17</i> | 17 | 0.6544 | -0.180 |
| Utilizando la ecuación ajustada: <i>Índice de envejecimiento = -0.0229x + 0.2112</i> | | | |
| <i>70-30-9</i> | 9 | - | 0.00052 |

3.4.5 Penetración

La prueba de penetración es la prueba de asfalto más antigua, cuyo principio básico es determinar la profundidad a la que una aguja penetra una muestra de asfalto bajo condiciones específicas de carga (100 g), tiempo (5 s) y temperatura (25° C). El método estándar de prueba se describe en la norma ASTM D5-06 *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials* y en este estudio se utilizó esta propiedad física para determinar la dosis adecuada de aditivo rejuvenecedor necesario para igualar el valor de penetración obtenido de la mezcla de ligantes (base y envejecido), al valor de penetración deseado, que para esta investigación es la misma consistencia del asfalto base.

En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos de penetración para las dosis de aditivo ensayadas y se determinó que, de acuerdo con este método, el 5 % de aditivo es el porcentaje adecuado para conseguir la condición del asfalto original.

Tabla 5. Dosificación de aditivo rejuvenecedor a partir del método de penetración.

| Identificación del asfalto | % Aditivo | Penetración promedio (1×10^{-1} mm) |
|----------------------------|-----------|--|
| Asfalto base | 0 | 31 |
| RAP' | 0 | 7 |
| 70 Base-30RAP' | 0 | 16 |
| 70-30-5 | 5 | 32 |
| 70-30-7 | 7 | 35 |

3.5 Diseño y evaluación de desempeño de mezclas asfálticas

La estructura del agregado mineral se definió a partir del ajuste de la curva combinada de los pétreos dentro de los parámetros establecidos para mezclas Superpave.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Se determinó el contenido de asfalto para cada una de las mezclas control (sin aditivo) con el objetivo de alcanzar un volumen de vacíos de aire de $4\% \pm 0.5$, posteriormente, estos contenidos se utilizaron también para la fabricación de especímenes con aditivo rejuvenecedor.

Para el análisis de desempeño de las mezclas asfálticas, se evaluó la propensión a la deformación permanente y el fenómeno de agrietamiento a partir de los ensayos de rueda cargada de Hamburgo y del ensayo semicircular SCB I-FIT respectivamente. Para dichos análisis se fabricaron cuatro réplicas de geometrías distintas según el ensayo, todas con un porcentaje de vacíos de aire objetivo del $7\% \pm 0.5$, y fueron ensayadas tras ser sometidas a un proceso de envejecimiento a corto plazo indicado de acuerdo con la absorción del agregado pétreo. Se fijaron temperaturas de mezclado y compactación de $165^\circ\text{C} \pm 5$ y $155^\circ\text{C} \pm 5$ respectivamente para todas las mezclas con y sin rejuvenecedor.

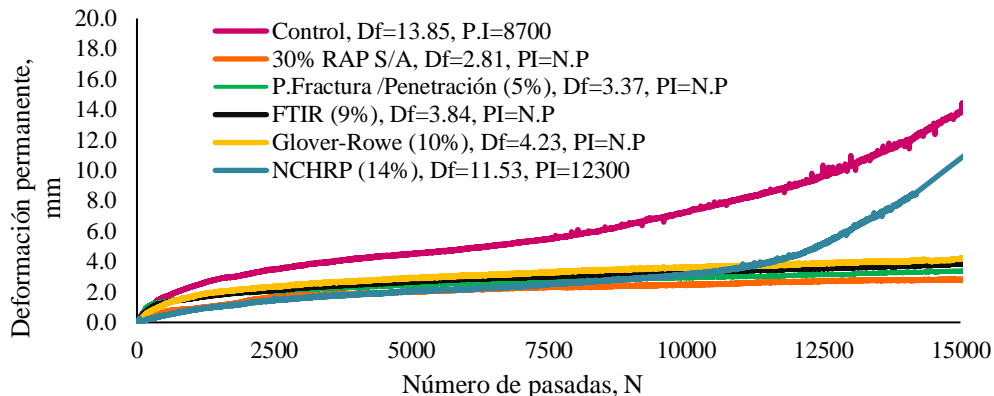
3.5.1 Deformación permanente

Para identificar fallas prematuras debidas a la susceptibilidad a la formación de roderas en mezclas asfálticas, una rigidez inadecuada, daño por humedad, debilidad en la estructura del agregado pétreo o adhesión inadecuada entre el asfalto y el agregado, se llevó a cabo la prueba de rueda cargada de Hamburgo, de acuerdo con lo establecido en el procedimiento AASHTO T 324 *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*.

La Figura 5 muestra el avance de la deformación en función del número de pasadas.

A partir de este gráfico es posible observar la influencia tanto del pavimento asfáltico recuperado (RAP) como del aditivo rejuvenecedor en el desempeño de las mezclas analizadas. Por un lado, la elevada rigidez que aporta la participación de 30 % de RAP disminuyó aproximadamente 80 % el potencial de deformación en comparación con la mezcla asfáltica de control y, por otro, se aprecia una fuerte relación entre la cantidad de aditivo presente y la deformación obtenida al final del ensayo, ya que conforme aumentó la concentración de aditivo, de igual manera se acumuló mayor deformación permanente.

En este sentido, se obtuvieron valores de ahuellamiento entre 3-5 milímetros bastante aceptables para las mezclas asfálticas con aditivo que fueron fabricadas con las dosis seleccionadas con base en las metodologías FTIR, G-R, potencial de fractura y penetración. No obstante, cuando se incorporó un 14 % de rejuvenecedor proveniente del método NCHRP, resultó en roderas excesivas y un cambio en la pendiente de deformación (punto de inflexión) indicando el desgranamiento o *stripping*, y exhibiendo un comportamiento similar a la mezcla de control, la cual también falló al acumular más de 10 milímetros de deformación después de 15 mil pasadas. Lo anterior podría ser atribuible a una sobredosificación de aditivo. Esta situación podría convertir al sistema en un material bastante inestable con rigidez inadecuada.



Df= deformación final (mm)

PI= punto de desgranamiento (pasadas)

N.P= no presentó desgranamiento

Figura 5. Curva característica de deformación permanente para las mezclas estudiadas



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

3.5.2 Índice de flexibilidad de Illinois (I-FIT)

Siguiendo el método de ensayo AASHTO TP124 *Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test (FIT)*, se llevó a cabo el análisis del comportamiento mecánico relacionado con la resistencia al agrietamiento a través del cálculo de la energía disipada durante el proceso de fractura por flexión en probetas semicirculares ranuradas en la parte inferior, para finalmente obtener un índice de flexibilidad (FI). De acuerdo con la metodología de prueba antes mencionada, el índice de flexibilidad recomendado tiene un valor mínimo de 8 para mezclas envejecidas a corto plazo. No obstante, en 2020, el NCHRP propuso utilizar mínimo 7 cuando se añade RAP en las mezclas asfálticas.

En la Figura 6 se muestra el avance de la grieta en la longitud total de cada elemento analizado, mientras que, en la Tabla 6 se comparan los indicadores de resistencia obtenidos en este ensayo.

Tabla 6. Parámetros de resistencia obtenidos de la curva carga-desplazamiento ensayo I-FIT.

| Mezcla asfáltica ID | Carga pico, kN | Módulo secante, kN/mm | Desplazamiento crítico, mm | Energía de fractura, J/m ² | Pendiente post-pico, kN-mm | Índice de Flexibilidad, U. adm |
|---|----------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Control | 2.14 | 4.96 | 1.87 | 850 | -2.51 | 3.40 |
| 30% RAP S/A | 3.96 | 8.40 | 1.46 | 1162 | -6.33 | 1.85 |
| P. Agrietamiento/ Penetración (5%) | 3.67 | 6.17 | 1.81 | 1380 | -5.04 | 2.77 |
| FTIR (9%) | 2.50 | 5.20 | 1.83 | 962 | -2.72 | 3.54 |
| Glover-Rowe (10%) | 3.16 | 4.87 | 1.92 | 1218 | -3.97 | 3.12 |
| NCHRP (14%) | 1.66 | 3.82 | 1.83 | 622 | -1.95 | 3.24 |

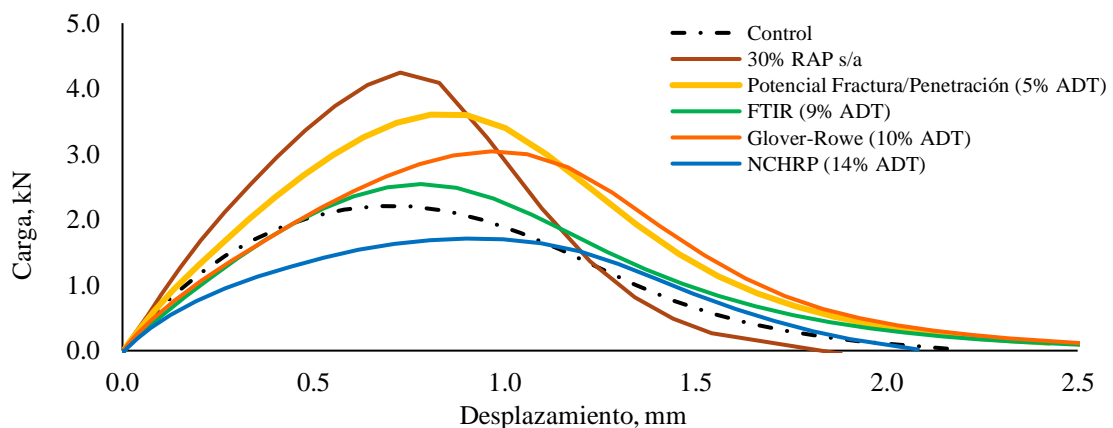


Figura 6. Curva carga-desplazamiento de las mezclas evaluadas.

En primer lugar, se puede apreciar que la mezcla asfáltica con 30 % de RAP incrementó notablemente su rigidez, ya que exhibe la carga pico y el módulo secante más elevado de todo el estudio. Sin embargo, las características anteriores estuvieron acompañadas de fuertes descensos de la curva carga-desplazamiento en la región postpico, lo cual causó aumentos significativos en el valor de la pendiente e índice de flexibilidad hasta un 55 % menor en comparación con el resultado obtenido en la mezcla de control.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Esta información advierte sobre la fragilidad e insuficiente capacidad para soportar el agrietamiento, así como mayor velocidad de propagación de fisuras en mezclas asfálticas con altos porcentajes de material reciclado. Si bien añadir aditivo rejuvenecedor provocó un aumento en la flexibilidad, el desempeño conseguido con la dosis propuesta por los métodos P. Fractura/Penetración fue muy bajo.

El descubrimiento anterior quizás no es tan sorprendente, dada la altísima rigidez/fragilidad exhibida por el asfalto envejecido en las pruebas de reología, la cual no termina por compensarse con la participación de 5 % de aditivo rejuvenecedor. En este orden de ideas, las mezclas recicladas que incorporan mayor cantidad de rejuvenecedor presentan índices de flexibilidad muy cercanos entre sí y, en el caso de la dosis calculada mediante el método FTIR (9 %), el desempeño de la mezcla reciclada fue superior respecto a su versión equivalente sin RAP.

No obstante, al analizar el proceso de rotura (disipación de la energía) se observan diferencias importantes en la forma de la curva carga-desplazamiento cuando fue añadido 14 % de aditivo. Por un lado, la energía de fractura es 580, 340, 228 J/m² menor en comparación con las otras mezclas asfálticas con 10, 9 y 0 % de aditivo, respectivamente. Además, su capacidad de deformarse valorada mediante el desplazamiento crítico no se modificó. Finalmente, los métodos de dosificación de aditivo rejuvenecedor que lograron balancear de mejor manera los seis indicadores de resistencia al agrietamiento fueron los métodos químicos FTIR y reológicos Glover-Rowe.

4 Conclusiones

A partir de los resultados que se obtuvieron en las diferentes etapas de esta investigación se tienen las siguientes conclusiones:

- Es posible reconocer que la selección del método para la dosificación/optimización de aditivo rejuvenecedor es crucial, pues las diferencias en las dosis que arroja cada procedimiento pueden llevar a resultados desfavorables o, en el mejor caso, lograr el contenido adecuado que permita obtener mezclas recicladas de alto desempeño.
- De acuerdo con los resultados en la mezcla, el método de dosificación que tuvo mejores resultados fue el de espectroscopía infrarroja, con el cual se logró una dosis óptima de rejuvenecedor, sin embargo, deberá utilizarse con cautela puesto que utilizar diferentes tipos de aditivos puede causar diferencias en la dosificación debido a la química del producto que se utilice. Debe analizarse cuidadosamente la composición química del aditivo para no confundir el fenómeno de oxidación (aumento en el grupo carbonilo) con la presencia de compuestos que aumenten la concentración de los grupos funcionales de interés.
- El FTIR es una metodología sencilla que requiere una muestra muy pequeña para su análisis, lo cual representa una ventaja para simplificar el proceso de optimización de la dosis de aditivo, ya que se necesita menor cantidad de muestra extraída del RAP, lo cual implica menor uso de solventes.
- Con el método Glover-Rowe fue posible obtener también una dosis de aditivo que proporcionó buenos resultados en la mezcla asfáltica muy cercana a la dosis obtenida con el infrarrojo, sin embargo, aunque es un ensayo sencillo de realizar, representa más tiempo para la elaboración de las curvas maestras y se basa en el análisis de un solo punto de la curva.
- Para la dosificación de aditivo por medio del método de potencial de fractura, es posible considerar otros parámetros de la curva que mejor ejemplifiquen el comportamiento de la mezcla, por lo que se sugiere analizar otros parámetros diferentes a la energía de fractura. Es un método que puede resultar más preciso debido a que es un barrido de 1010 puntos, lo cual da un panorama completo de lo que sucede en el asfalto.
- Es de destacar que la optimización de la dosificación de rejuvenecedor en la etapa de prueba de asfalto que se llevó a cabo en esta investigación, asume un escenario de mezcla completa,



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

en donde se toma en cuenta el porcentaje de RAP a utilizar en la mezcla final, por lo que se recomienda que en el análisis de cualquier método para dosificar se considere la “mezcla de asfaltos” (virgen más envejecido), pues esto ayudará a crear una condición similar a la mezcla asfáltica reciclada que se fabrique.

- Los protocolos de envejecimiento de laboratorio usados pueden no ser lo suficientemente rigurosos para simular el asfalto envejecido del RAP, no obstante, la facilidad de realización de los ensayos seleccionados para la optimización de aditivo permite realizar las pruebas con el material extraído de RAP sin que esto implique un esfuerzo mayor.
- La eficacia a largo plazo de la dosis de aditivo determinada se debe evaluar en estudios futuros.

5 Referencias

- [1] Zaid Hazim Al-Saffar, H. G. (2023). Tailored enhancement of reclaimed asphalt pavement with waste engine oil/vacuum residue blend as rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 409.
- [2] W. S. Mogawer, A. J. (January 2016). Using Polymer Modification and Rejuvenators to Improve. *Transportation Research Record* 2575, no. 1, 10–18.
- [3] A. Ongel and M. Hugener. (September 2015). Impact of Rejuvenators on Aging Properties of Bitumen. *Construction and Building*, 467–474.
- [4] M. Chen, B. Leng, S. Wu, and Y. Sang. (September 2014). Physical, Chemical and Rheological Properties of Waste Edible Vegetable Oil Rejuvenated Asphalt Binders . *Construction and Building Materials* 66, 286–298.
- [5] National Center for Asphalt Technology. (2014). NCAT Researchers Explore Multiple Uses of Rejuvenators. *Asphalt Technology*, 7-16.
- [6] Gutiérrez Muñoz A., Benítez López R. (2021). Nuevo método de prueba para determinar el potencial de fractura del ligante asfáltico. *Carreteras*, 30-40.
- [7] Barghabany P., Zhang J., Mohammad L. N., B. Cooper III S. and B. Cooper Jr S. (2022). Chemical and Rheological Characterization of Asphalt Binders: A Comparison of Asphalt Binder Aging and Asphalt Mixture Aging. *Transportation Research Record*, Vol. 2676(5), 147–157.