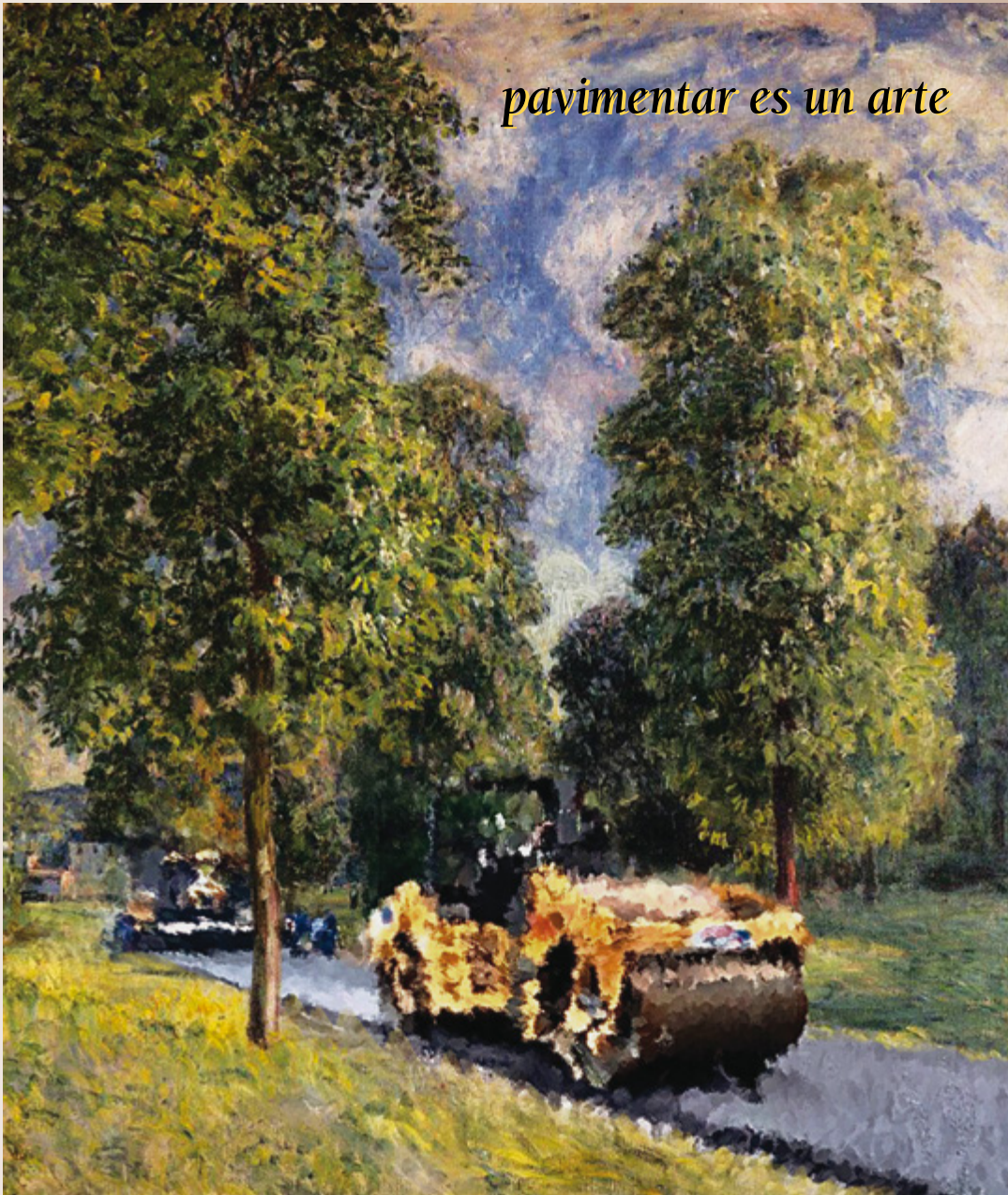


ASFÁLTICA

REVISTA TÉCNICA



pavimentar es un arte

- ☞ **Influencia de la capacidad estructural en programas de conservación a nivel de RED**
- ☞ **Impacto de la adición de aceites vegetales en las propiedades de una combinación de asfalto virgen y asfalto envejecido**





“ Con soluciones sustentables,
nos enfocamos en la preservación
oportuna de pavimentos del país.”

Carlos Coria
Asesor en Gestión y Diseño
Estructural de Pavimentos



*CONSOLIDANDO NUESTRA TRAYECTORIA,
ABRIENDO NUEVOS CAMINOS.*

 **Ergon® Asfaltos
México**

ergonasfaltos.com

VANGUARDIA TECNOLÓGICA. SERVICIO TÉCNICO DE ALTO NIVEL.



PRENSA TSR (NIVEL I),
MARSHALL, SCB,
CBR, TRIAXIAL



PRENSA SERVO-HIDRÁULICA 30 KN,
MÓDULO DINÁMICO (NIVEL III)



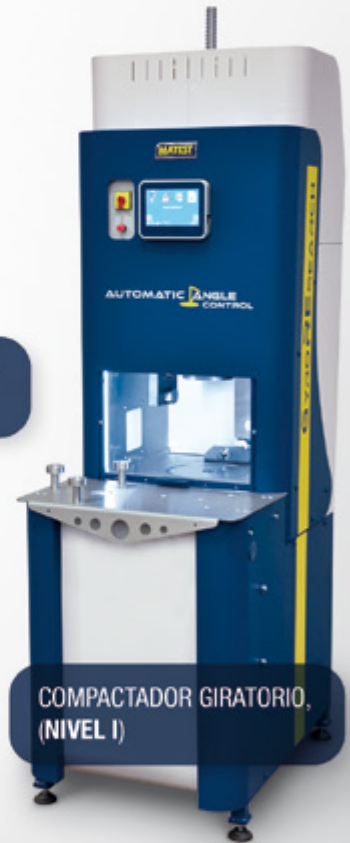
4PB AUTÓNOMO SERVO-NEUMÁTICO,
FATIGA (NIVEL IV)



HORNO DE PELÍCULA
DELGADA, RTFO
(ASTM D2872)



OLLA DE DESGASIFICACIÓN,
VDO (ASTM D6521)



COMPACTADOR GIRATORIO,
(NIVEL I)



OLLA DE PRESIÓN,
PAV (ASTM D6521)



RUEDA DE HAMBURGO,
(NIVEL II)



Hamburg Wheel
Tracker in USA

NUESTRAS MARCAS

MATEST
PAVETEST



Certificadas en ISO 9001
Estricta conformidad
Protocolo AMAAC,
Normas AASHTO y ASTM

MATECH OF AMERICAS CORP., S. DE R.L. DE C.V.

Lago Chapala Oriente #9,
Col. Manantiales, San Pedro Cholula, C.P. 72760, Puebla, MEXICO
Tels. (+52) 22 25 03 46 53 / 54
Mail. info@matech.mx
www.matech.mx | www.matest.com
www.pavetest.com | www.instrotek.com



PACCSA
INGENIERÍA

EVOLUCIÓN EN MOVIMIENTO

QUE TU CAMINO SEA SEGURO Y CONFIABLE, ES LO MÁS IMPORTANTE PARA NOSOTROS.

SOMOS PACCSA INGENIERÍA UNA EMPRESA CON AMPLIA EXPERIENCIA EN SERVICIOS DE INGENIERÍA CIVIL EN EL RAMO DE LAS VÍAS TERRESTRES AEROPUERTOS E INFRAESTRUCTURA CARRETERA. CONTAMOS CON ESPECIALISTAS CERTIFICADOS, LABORATORIOS RECONOCIDOS, PERITOS EN VÍAS TERRESTRES, ETC.

CONTAMOS CON ACREDITACIÓN ANTE LA **ema**.
RECONOCIMIENTO AMAAC - IMT NIVEL IV Y CERTIFICACIÓN ACI.

PARA CONOCER NUESTROS SERVICIOS COMPLETOS VISITA NUESTRA PÁGINA WEB:

www.paccsaingenieria.com.mx

O CONTÁCTANOS VÍA WHATS APP 552628-3462 Y POR MAIL EN CONTACTO@PACCSAINGENIERIA.COM.MX

Sumario

- 5** Influencia de la capacidad estructural en programas de conservación a nivel de RED
- 18** Impacto de la adición de aceites vegetales en las propiedades de una combinación de asfalto virgen y asfalto envejecido
- 27** El diseño balanceado y el efecto del rejuvenecedor en mezclas asfálticas en caliente con RAP
- 43** Plan de señalamiento vial para la auscultación de pavimentos
- 52** Evaluación de las propiedades mecánicas a deformación permanente de mezclas asfálticas para carreteras de alto tránsito

Presidente

Jorge Alarcón Ibarra

Vicepresidentes

Víctor M. Cincire Romero Aburto
Juan Adrián Ramírez Aldaco
Benjamín Escudero Rivas

Secretario

Hugo Bandala Vázquez

Tesorero

Santiago Villanueva Martínez

Vocales

Luis Enrique Ramírez Soto
Alejandro Díaz Cruz
Ricardo Buzo Romero
Javier Herrera de León
Jorge García Ascencio†
Fernando Martín del Campo Aviña
Alejandro Mungaray Moctezuma
Luis Carlos Soto Moreno

Comité de Vigilancia

Gastón García Padilla y Arroba
Luis Guillermo Limón Garduño

Comisión de Honor

Ignacio R. Cremades Ibáñez
José Jorge López Urtusuástegui
Verónica Flores Déleon

Director General

Raúl V. Orozco Escoto
dg@amaac.org.mx
www.amaac.org.mx

Diseño y formación

Lizbeth de Lucio



Editorial



Entramos en el último trimestre del año, con muchas actividades y esperando cerrar de la mejor manera nuestro ciclo al frente del XI Consejo Directivo de AMAAC.

Quiero felicitar al Comité de Impulso Profesional por la magnífica organización del Ier. Congreso Académico del Asfalto, fue un evento muy exitoso con más de 4,000 participantes de 31 países; la gran calidad de las ponencias y el divertido jeopardy, fueron el principal atractivo y gracias a ello se logró superar hasta cifras impensables, la meta inicialmente planteada por la organización, estoy seguro que conseguiremos replicarlo en un futuro con resultados aún mejores.

Hace unos días iniciamos el Programa de Dirección en Innovación y Adaptabilidad a las Tendencias Globales AMAAC-IPADE, con una demanda que superó la capacidad que teníamos prevista, esta es una muestra más, del interés tan grande que hay por parte de la familia AMAAC por la capacitación y actualización en temas técnicos y directivos, es así que intentamos abarcar todos los aspectos necesarios para la formación integral de nuestros asociados y amigos.

Estamos a pocos días de la realización de nuestro evento más esperado de los últimos años, el XI Congreso Mexicano del Asfalto, ya estamos listos para recibirlos a todos, congresistas, ponentes, expositores y acompañantes; todo el staff de AMAAC ha puesto el mayor empeño y dedicación para cuidar hasta el último detalle para todos ustedes, estamos seguros que será un marco incomparable para el reencuentro de grandes amigos, intercambio de conocimientos y experiencias, actualización profesional, realización de negocios, activación deportiva y también para el esparcimiento. Nuestra apretada agenda tendrá en todo momento una actividad acorde a las necesidades de nuestros asistentes, esperamos cubrir sus expectativas y que sea del agrado de todos, lo hemos organizado de todo corazón.

No quiero dejar pasar esta oportunidad para agradecer a todos los que hicieron posible que lográramos sacar adelante los objetivos que nos planteamos durante los últimos tres años en la Asociación, especialmente a los miembros de mi mesa directiva y a todo el staff de AMAAC que en todo momento me brindaron su apoyo incondicional, espero no haberlos defraudado.

Ahora vendrá una nueva etapa en la Asociación, seguro estoy que será muy exitosa la gestión del XII Consejo Directivo, y desde hoy les deseo el mayor de los éxitos y me sumo a sus proyectos e iniciativas.

La revista **ASFÁLTICA** seguirá siendo un referente para la actualización de nuestro medio y un excelente medio para la difusión de nuestras actividades gremiales, los invito a seguir publicando sus avances más importantes en sus páginas, que siempre estarán dispuestas a recibir y esparcir el conocimiento.

¡Un fraternal saludo para todos!

Jorge Alarcón Ibarra
Presidente

Undécimo Consejo Directivo



Paisaje en Sevres
Alfred Sisley (1839-1899)

Considerado junto a Monet “el impresionista más puro”, fue uno de los miembros más ortodoxos de este grupo de pintores, en espíritu y forma, por su elección del paisaje, su tratamiento de las variaciones atmosféricas y la delicadeza de sus toques y sus colores.

*Ilustración sobre el original
Por: Omar Maya V.*

Influencia de la capacidad estructural en programas de conservación a nivel de RED

Ricardo Solorio Murillo
Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, México
rsolorio@imt.mx
Montserrat Montoya Ortega
Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, México
mmontoyao@imt.mx

Introducción

Hasta hace algunos años, la oferta de equipos para la medición de las deflexiones de pavimentos solo incluía aparatos de bajo rendimiento, como el deflectómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer, FWD*). Aunque esta situación ha cambiado con el desarrollo de dispositivos de medición continua como el *deflectómetro a velocidad de operación (Traffic Speed Deflectometer, TSD)* o el *deflectómetro de rueda móvil (Rolling Wheel Deflectometer, RWD)*, los equipos puntuales siguen teniendo un uso generalizado en la evaluación estructural de pavimentos a nivel de red.

Sin embargo, este tipo de uso para equipos como el FWD suele estar acompañado de problemas en los ámbitos de la seguridad vial, el control del tránsito y la productividad del proceso de medición, los cuales, aunados a los costos vinculados, han contribuido a que algunas organizaciones de carreteras opten por no tomar en cuenta explícitamente la capacidad estructural en la preparación de sus programas de obra de mediano y largo plazo.

Es importante subrayar que la omisión de los atributos de capacidad estructural solo puede ser admisible en el nivel de red de la gestión de pavimentos, ya que en este nivel generalmente se analizan opciones preliminares que pueden incluir acciones no necesariamente óptimas desde el punto de vista técnico.

En el caso de México, debe considerarse también la aplicación extendida del sistema HDM-4 para preparar programas de conservación, particularmente en lo que se refiere a la red federal libre de peaje. A este respecto, cabe destacar que, si bien por un lado esta herramienta utiliza indicadores y modelos de deterioro para describir la evolución de la capacidad de carga de los pavimentos en el tiempo, por otro no provee mecanismos para emplear tales indicadores como criterios de intervención, lo que, en términos prácticos, impide la activación de acciones de remediación estructural y, consecuentemente, un reflejo efectivo de la capacidad de carga actual del pavimento en los programas de conservación.

Tomando en cuenta la dificultad anterior y al efecto de aplicar el HDM-4 como herramienta de programación en este trabajo, se retomó un procedimiento desarrollado para los cursos que ha impartido el IMT sobre la aplicación de este software en la formulación de programas de obra basados en el desempeño. De manera general, el procedimiento se basa en la extracción del patrón de evolución del comportamiento estructural de los tramos del archivo de resultados del

HDM-4, y en el uso de esta información para preasignar obras destinadas a la corrección de defectos estructurales caracterizados por valores de deflexión que exceden ciertos umbrales. La última parte del procedimiento consiste en la creación de archivos de intercambio del sistema con definiciones de análisis en los que se incluyen acciones para mejorar la capacidad portante. Los programas de obra así obtenidos se comparan con otros destinados a corregir únicamente aspectos funcionales.

Durante el estudio, la capacidad funcional de los tramos se evaluó en términos del Índice de Regularidad Internacional (IRI), mientras que, como medida de la capacidad estructural, se utilizó la deflexión central medida con equipo FWD y normalizada en 700 kPa. Por lo regular, la deflexión central (denotada en este documento por D_0) no permite caracterizar por sí sola la competencia del pavimento para soportar unas determinadas solicitaciones de carga, sin embargo, en el contexto del HDM-4, este indicador se ha correlacionado con un parámetro similar al número estructural de AASHTO, por lo que puede considerarse adecuado para los fines de este trabajo.

Los análisis efectuados con el HDM-4 se basan en tres estándares de conservación definidos *ex profeso*: *mantenimiento rutinario*, *conservación periódica* y *reconstrucción + conservación periódica*. El último estándar se aplica cuando se toman en cuenta la condición estructural y el nivel de servicio del pavimento, mientras que el estándar que solo contempla conservación periódica se activa en los análisis basados exclusivamente en la evaluación de la capacidad funcional.

El trabajo fue desarrollado con información proporcionada por una dependencia de gobierno que tiene a su cargo la conservación de carreteras federales en el país. Los datos abarcan tres carreteras troncales con longitudes de 27, 150 y 105 km a las que, en este documento, se identifica como *carretera 1*, *carretera 2* y *carretera 3*. La información incluye mediciones del IRI y de las deflexiones del pavimento efectuadas a intervalos de 20 y 100 m, respectivamente. Los tramos del análisis se hicieron coincidir con cada uno los cuerpos de las tres carreteras, de modo que, tomando en cuenta la convención nominal antes mencionada, se identificó a los tramos con secuencias del tipo *I-A*, (carretera 1, cuerpo “A”), *I-B* (carretera 1, cuerpo “B”) y así sucesivamente.

Uso de la deflexión central como criterio de intervención en el HDM-4

Bases del procedimiento

El procedimiento adoptado en el IMT para el uso de la deflexión central D_0 como criterio de intervención, se basa en las siguientes características del HDM-4:

- La herramienta almacena los resultados de cualquier análisis en una base de datos de Access. El componente central de esta base de datos es la tabla AnnualData, que concentra los registros de evolución por alternativa y por año del periodo de análisis de cualquiera de las variables del sistema. El HDM-4 caracteriza la capacidad estructural de un pavimento mediante el parámetro denominado *número estructural ajustado (SNPK)*,^[1] el cual tiene una estructura muy similar al número estructural de la AASHTO.^[2] SNPK se relaciona con la deflexión central normalizada en 700 kPa mediante las expresiones:

$$D_0 = 6.5 (SNPK_s^{-1.6}) \text{ para bases no cementadas y:}$$
$$D_0 = 3.5 (SNPK_s^{-1.6}) \text{ para bases cementadas.}$$

La información de AnnualData puede importarse en Excel para llevar a cabo los procesos adicionales que se desee, como aplicar las ecuaciones anteriores para expresar la capacidad de carga en términos de la deflexión central.

- Prácticamente todos los *objetos de datos* del HDM-4, esto es, flotas vehiculares, redes de carreteras, estándares de conservación, zonas climáticas, series de calibración y, también, las definiciones de los análisis, pueden exportarse e importarse mediante archivos de intercambio con formato de Access. De esta manera, los componentes de los diferentes objetos pueden, a su vez, modificarse en Excel o en alguna otra aplicación externa al HDM-4.
- La definición de los tres tipos de análisis incluidos en el HDM-4 (de *proyecto*, de *programa* o de *estrategia*) comprende la especificación de las alternativas y los estándares de trabajo aplicables en cada tramo durante el periodo de análisis. Según lo indicado en el punto anterior, se pueden hacer cambios a esta definición por fuera del

HDM-4, a fin de prever la corrección de las deficiencias estructurales que pudieran detectarse en primera instancia.

Etapas de aplicación

Con base en las características anteriores, el IMT desarrolló un procedimiento para aplicar criterios de capacidad estructural durante los cursos sobre *Aplicación del HDM-4 en la obtención de programas de obra para contratos basados en el desempeño* impartidos en los años 2018, 2019 y 2021. A continuación se describen brevemente las principales etapas de este procedimiento.

- a) Definir un estándar de conservación periódica con el que se activen trabajos de rehabilitación de la carpeta asfáltica siempre que el *IRI* exceda un valor límite determinado.
- b) Efectuar un primer análisis con una alternativa de proyecto vinculada al estándar del punto anterior y una alternativa base ligada a un estándar de mantenimiento rutinario. En los cursos y en el presente estudio se ha optado por un análisis de estrategias, pero el método puede aplicarse con cualquier tipo de análisis.
- c) Recuperar las proyecciones de *SNPK* de la base de datos de resultados del HDM-4 generada con el análisis anterior y expresarlas en términos de D_0 . Identificar en el pronóstico el primer año en el que la deflexión central exceda un cierto umbral; por ejemplo, el valor de 0.5 mm especificado en la normativa SCT como límite de “una buena condición estructural”,^[3] siempre que esto efectivamente ocurra.

A manera de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los resultados de la extracción de D_0 para el cuerpo “A” de la carretera 1 y la identificación de casos con un valor superior a 0.5 mm.

- d) Exportar el análisis del inciso *b*, recuperar la información del correspondiente archivo de Access y modificarla en Excel de manera que, para los segmentos con mm, se programen los trabajos necesarios para revertir las deficiencias estructurales (p. ej. una reconstrucción o una rehabilitación más radical).
- e) Crear estándares de conservación adicionales, basados en el de conservación periódica, que contemplen los trabajos mencionados en el inciso anterior.
- f) Incorporar al archivo de Access las modificaciones realizadas en Excel, reimportar el análisis y hacer una nueva corrida.
- g) Como puede apreciarse, el procedimiento propuesto permite verificar el cumplimiento de los requisitos de desempeño estructural de cada segmento durante el periodo de análisis, así como asignar los trabajos de conservación necesarios para atender los defectos que eventualmente se detecten.



¿Tienes un artículo técnico?

...envíalo a capacitacion@amaac.org.mx y podrá ser publicado en

ASFÁLTICA
REVISTA TÉCNICA

Tabla 1. Evolución de D_0 en el tramo 1-A

Segmento	D_0										Año $D_0 \geq 0.5$
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	
1A001	0.635	0.543	0.543	0.545	0.546	0.548	0.554	0.556	0.560	0.527	2020
1A002	0.249	0.252	0.254	0.257	0.241	0.241	0.241	0.241	0.241	0.241	-
1A003	0.343	0.348	0.351	0.354	0.352	0.356	0.353	0.358	0.330	0.330	-
1A004	0.288	0.290	0.292	0.296	0.298	0.301	0.299	0.302	0.300	0.282	-
1A005	0.372	0.375	0.380	0.382	0.385	0.389	0.386	0.361	0.361	0.361	-
1A006	0.253	0.254	0.258	0.259	0.260	0.263	0.261	0.264	0.262	0.247	-
1A007	0.385	0.391	0.395	0.399	0.396	0.400	0.370	0.370	0.370	0.370	-
1A008	0.271	0.273	0.277	0.278	0.281	0.284	0.281	0.285	0.265	0.265	-

Estándares de conservación

Aspectos generales

Dentro del HDM-4, las intervenciones de mantenimiento se definen mediante estructuras de datos conocidas como *estándares de conservación*, las cuales consisten esencialmente en conjuntos de obras individuales (p. ej. bacheo, microcarpeta, o fresado y reemplazo de la carpeta estructural) que se eligen y diseñan para intervenir en un tramo carretero de una manera determinada a lo largo de un periodo de análisis predefinido.

En los análisis del presente estudio se emplean los tres estándares de conservación que se describen enseguida:

- Mantenimiento rutinario.** Corrige defectos superficiales con el fin de disminuir la tasa de deterioro del pavimento. Comprende los trabajos siguientes: bacheo, reparación de áreas afectadas por el desprendimiento de agregado pétreo y reparación de grietas anchas.
- Conservación periódica.** Tiene por objeto restituir las características deseadas de regularidad, que normalmente se expresan mediante un valor máximo admisible de. En este caso, se ha elegido $IRI_{max} = 2.5$ m/km, límite que corresponde al umbral establecido en la normativa SCT para clasificar un tramo de autopista o corredor carretero como “aceptable” en términos de la regularidad. El estándar prevé la ejecución de un

fresado de 5 cm de la capa superficial y la colocación de una nueva carpeta asfáltica con este mismo espesor siempre que se exceda el valor admisible de *IRI*.

- Reconstrucción + conservación periódica.** Contempla, por una parte, la reconstrucción del pavimento en el primer año en el que se detecte que D_0 excede el valor límite de 0.5 mm definido en la normativa SCT para tramos con una buena capacidad de carga. La reconstrucción incluye la colocación de una capa asfáltica de 10 cm. Se incluyen también en este estándar los trabajos de fresado y reemplazo para el control de la regularidad referidos en el párrafo anterior.

Detalles de los estándares

En la Tabla 2 se presentan los detalles de los estándares empleados en los análisis.

En relación con los efectos de los trabajos, cabe mencionar que, aunque el HDM-4 puede estimar los valores de *IRI*, profundidad de la macrotextura y coeficiente de fricción posteriores a la ejecución de los trabajos, se ha optado por especificar estos valores directamente, a fin de normalizar las comparaciones que se presentan en la sección 4.

Por lo que se refiere a la recuperación de la deflexión central debida a la reconstrucción, el valor que se indica resulta de convertir el número estructural ingresado al programa como parte de los datos de diseño de esta obra a su equivalente en deflexión bajo carga.

Tabla 2. Estándares de conservación definidos para los análisis

Trabajos	Criterio de intervención	Efectos	Costo unitario
Mantenimiento rutinario			
Bacheo	$n \geq 1$ baches / km	100 % reparado	\$286.00/m ²
Reparación de desprendimientos	ARV ≥ 5 %	100 % reparado	\$73.97/m ²
Reparación de grietas anchas	ACW ≥ 5 %	100 % reparado	\$117.85/ m ²
Conservación periódica			
Fresado y reemplazo de 5 cm	IRI ≥ 2.5 m / km	IRI = 1.5 m/km MTX = 1 mm CF = 0.55	\$196.08/m ²
Acciones de mantenimiento rutinario			
Reconstrucción + conservación periódica			
Reconstrucción	$D_0 \geq 0.500$ mm	$D_0 = 0.257$ mm IRI = 1.5 m/km MTX = 1 mm CF = 0.55	\$465.52 /m ²
Acciones de conservación periódica			
Acciones de mantenimiento rutinario			

n: Número de baches por kilómetro.

ARV: Área con desprendimiento de agregado pétreo, en porcentaje.

ACW: Área con agrietamiento estructural ancho (ancho mayor o igual a 3 mm), en porcentaje.

MTX: Profundidad de la macrotextura, en mm.

CF: Coeficiente de fricción medido con equipo SCRIM a 50 km/h.

Finalmente, debe aclararse que los costos unitarios de la Tabla 2 representan órdenes de magnitud y no precios de mercado actualizados.

Obtención y comparación de programas de obra

División de los tramos en segmentos homogéneos

Una inspección preliminar de los datos vinculados a los seis tramos del estudio (las tres carreteras divididas en cuerpos), permitió verificar que la deflexión central, el IRI y otros atributos del pavimento tienen cambios significativos a lo largo de cada tramo. Por consiguiente, los tramos fueron divididos en *segmentos homogéneos* con base en la variación de D_0 , que es el principal parámetro de interés. Para la identificación de los límites de los segmentos, se aplicó un algoritmo de segmentación desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte.^[4]

Como ejemplo del proceso de segmentación, en la Figura 1 se presenta el larguillo de del tramo 2-A junto con los segmentos homogéneos obtenidos para este tramo. El larguillo muestra un comportamiento claramente diferenciado del subtramo comprendido aproximadamente entre los kilómetros 146 y 182.

Para cada segmento homogéneo, se utilizó como valor representativo de D_0 el promedio de las mediciones efectuadas en el segmento. Con respecto al resto de los datos de entrada, dado que, en términos generales, están definidos para longitudes distintas a las de los segmentos homogéneos, se asignaron valores representativos con base en distintas reglas de transformación, como se indica en la Tabla 3.^[5]

Aplicación del HDM-4

Los análisis efectuados para la obtención de los programas de obra se basaron en la aplicación del HDM-4 conocida como *análisis de estrategias*, única en la que es posible integrar, jerarquizar y optimizar los programas según su contribución a la mejora del estado del pavimento, medida en términos de la recuperación del IRI. En este sentido, debe recordarse que, cuando se aplica el procedimiento de evaluación alternativo del HDM-4, el cual se basa en criterios de rentabilidad, el sistema excluye de los programas las acciones con beneficios negativos, lo que dificulta la realización de estudios orientados a los aspectos técnicos del problema, como el presente trabajo.

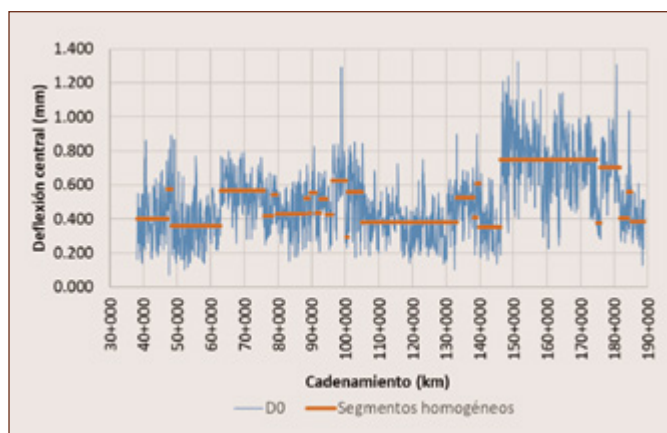


Figura 1. Mediciones y segmentos homogéneos de D_0 para tramo 2-A.

Tabla 3. Procesos de transformación de datos

Parámetro	Regla de transformación
Indicadores del estado (IRI, profundidad de roderas, agrietamiento, macrotextura, etc.)	Promedio de mediciones en el segmento homogéneo
Espesores de las capas	
Alineamientos, altitud	
Climas	Valores más extendidos
Años de ejecución de trabajos previos	
Tipos de pavimento	Valores del segmento de aforo si no hay cortes de este dentro del segmento homogéneo o promedio ponderado en caso contrario
Volumen y composición del tránsito	

Adicionalmente, los diferentes análisis se llevaron a cabo con los siguientes datos generales: año de inicio, 2020; periodo de análisis, 20 años; tasa de actualización, 10%; tasa de crecimiento del tránsito, 3.5%.

Cada ejercicio de comparación implicó la realización de dos corridas de análisis de estrategias, en las que se evaluaron alternativas de proyecto definidas como se indica a continuación:

- *Corrida 1.* Alternativa de proyecto vinculada al estándar de conservación periódica que comprende la realización de trabajos de fresado y reemplazo cuando el IRI exceda el umbral de 2.5 m/km (alternativa CP).
- *Corrida 2.* Alternativa de proyecto vinculada a estándares de reconstrucción + conservación periódica en los que se prevé la reconstrucción del pavimento en el primer año en el que D_0 exceda

el límite de 0.5 mm y la realización subsecuente de trabajos de fresado y reemplazo siempre que m/km (alternativa REC + CP).

En las dos corridas, las alternativas de proyecto se evalúan en relación con una alternativa base que solo considera mantenimiento de rutina.

Tramo 1-A

La Tabla 4 contiene los programas del tramo 1-A para las dos corridas efectuadas, desglosados por segmento homogéneo. Los trabajos de ambos programas se distinguen entre sí por el fondo de las celdas que contienen códigos de obra (FR5 para el fresado y reemplazo de 5 cm y REC para la reconstrucción). Así, en el caso del programa que solo considera conservación periódica (basado en la alternativa CP), las celdas tienen un fondo claro, mien-

tras que en el del programa que contempla también la reconstrucción del pavimento (alternativa *REC + CP*), el fondo es oscuro. La repetición de una obra en ambos programas se indica colocando un borde a la celda. Por último, también se incluye la longitud y los valores promedio de *IRI* y D_0 de los segmentos homogéneos.

Como se aprecia en la Tabla 4, solo el primer segmento del tramo 1-A tiene promedios de los dos parámetros que exceden los límites especificados en los estándares para la activación de acciones de con-

servación. Correspondientemente, los programas solo contienen obras en el primer año para este segmento, mientras que, para el resto del tramo, las obras se inician a partir del cuarto año del periodo de análisis, en consonancia con los valores iniciales de los indicadores del estado físico. De acuerdo con la simbología adoptada para la representación de los programas *CP* y *REC + CP*, la única diferencia entre ambos es la sustitución, para el primer segmento homogéneo, de obras de fresado y reemplazo en los años 2020 y 2028 por una de reconstrucción en 2020.

Tabla 4. Programas de obra del tramo 1-A

Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D_0 (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
1A001	0.700	4.01	0.517	FR5 REC								FR5	
1A002	8.800	2.13	0.226				FR5						
1A003	1.900	1.41	0.310								FR5		
1A004	1.400	1.46	0.264									FR5	
1A005	8.900	1.66	0.339							FR5			
1A006	1.203	1.49	0.231									FR5	
1A007	0.498	1.81	0.347						FR5				
1A008	3.899	1.69	0.248								FR5		

Tramo 1-B

De acuerdo con la Tabla 5, los valores promedio iniciales de *IRI* y D_0 de los cuatro segmentos homogéneos en que resultó dividido este tramo se encuentran por debajo de los correspondientes lí-

mites, con márgenes más o menos amplios. De esta manera, el programa *CP* solo contiene obras para el primero y cuarto segmentos en el último año del periodo de análisis.

Tabla 5. Programas de obra del tramo 1-B

Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D_0 (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
1B001	5.499	1.56	0.272										FR5
1B002	6.396	1.44	0.194										
1B003	1.688	1.51	0.251										
1B004	13.717	1.49	0.184										FR5

Por otro lado, al aplicar el procedimiento descrito en la sección 2, se pudo verificar que la condición $D_0 > 0.5$ mm no se cumple en ninguno de los años del periodo de análisis, de manera que, en este caso, no se generó el programa *REC + CP*.

Tramo 2-A

La carretera 2 tiene una longitud casi seis veces mayor que la de la carretera 1 (150 contra 27 km), lo que, aunado a un estado físico heterogéneo, produjo un número de segmentos homogéneos 3.5 veces mayor, como puede observarse la Tabla 6.

Tabla 6. Programas de obra del tramo 2-A

Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D ₀ (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
2A001	8.900	2.89	0.400	FR5									
2A002	1.300	1.70	0.573	REC						FR5			
2A003	14.400	2.27	0.361				FR5						
2A004	13.000	2.10	0.567	REC			FR5						
2A005	2.500	1.70	0.418								FR5		
2A006	1.300	1.41	0.541	REC								FR5	
2A007	8.700	1.49	0.430										FR5
2A008	0.900	1.50	0.519	REC								FR5	
2A009	0.400	1.30	0.435										
2A010	1.800	1.46	0.556	REC								FR5	
2A011	1.200	1.48	0.434										FR5
2A012	1.800	1.88	0.518	REC					FR5				
2A013	1.700	2.20	0.425			FR5							
2A014	4.300	2.69	0.624	FR5									
				REC									
2A015	0.300	2.64	0.292	FR5									
2A016	4.300	2.63	0.558	FR5									
				REC									
2A017	28.200	1.76	0.381							FR5			
2A018	5.100	1.60	0.524	REC							FR5		
2A019	0.800	1.53	0.408									FR5	
2A020	0.700	1.35	0.607	REC								FR5	
2A021	6.400	1.47	0.352										FR5
2A022	28.700	1.41	0.749	REC							FR5		
2A023	0.900	1.24	0.377										
2A024	5.900	1.30	0.704	REC								FR5	
2A025	2.400	1.27	0.406										
2A026	0.900	1.19	0.559	REC									
2A027	3.800	1.32	0.386										

Esta tabla muestra que la mayoría de los segmentos homogéneos tienen un IRI menor a 2.5 m/km, aunque se observa una cierta dispersión. En contraste, la revisión secuencial de los valores de D₀ revela que los segmentos exceden de manera alternada el umbral de 0.5 mm.

De acuerdo con la Tabla 2, el estándar de conservación de la alternativa CP fue diseñado con el objeto de activar trabajos para la recuperación del IRI. Así, dada la variabilidad de los valores iniciales

de este parámetro, el programa CP (ver Tabla 6) resultó con obras de fresado y reemplazo distribuidas en todo el periodo de análisis, aunque se concentran mayoritariamente en los últimos cinco años.

Al mismo tiempo, el comportamiento alternado de D₀ al inicio del periodo con respecto al umbral, provocó la activación también alternada de trabajos de reconstrucción en el primer año para el programa REC+CP, como puede apreciarse en la misma tabla. Con lo anterior, el total de las trece acciones de re-

construcción del programa quedó concentrado en el primer año.

Tramo 2-B

De los tramos analizados, el tramo 2-B fue el que mostró los peores niveles de desempeño funcional

y estructural. El mal estado del pavimento generalmente se refleja en una mayor dispersión de los datos y, en este caso específico, se tradujo en el mayor número de segmentos homogéneos obtenido durante el estudio, como puede apreciarse en la Tabla 7.

Tabla 7. Programas de obra del tramo 2-B													
Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D ₀ (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
2B001	1.400	5.10	0.344	FR5									
2B002	5.600	2.82	0.679	FR5									
				REC									
2B003	2.500	2.58	0.388	FR5									
2B004	0.900	2.05	0.464						FR5				
2B005	3.900	2.48	0.403	FR5									
2B006	17.900	2.34	0.549	REC		FR5							
2B007	1.600	1.64	0.419										FR5
2B008	2.900	1.73	0.485					REC				FR5	
2B009	2.200	1.60	0.389										FR5
2B010	3.600	1.56	0.502	REC									FR5
2B011	5.200	1.71	0.337									FR5	
2B012	20.900	2.59	0.574	FR5									
				REC									
2B013	1.800	2.87	0.333	FR5									
2B014	1.400	2.75	0.472	FR5									
2B015	5.700	2.05	0.406					FR5					
2B016	0.600	1.78	0.527	REC						FR5			
2B017	1.500	1.72	0.358								FR5		
2B018	4.200	1.96	0.500	REC					FR5				
2B019	2.800	2.02	0.358					FR5					
2B020	1.500	1.94	0.577	REC				FR5					
2B021	0.700	1.98	0.378					FR5					
2B022	1.700	2.39	0.519	REC	FR5								
2B023	1.500	2.57	0.430	FR5									
2B024	3.300	2.78	0.531	FR5									
				REC									
2B025	6.200	3.61	0.333	FR5									
2B026	16.000	2.93	0.777	FR5									
				REC									
2B027	3.400	3.12	0.368	FR5									
2B028	1.700	2.95	0.498	FR5									
				REC									
2B029	28.000	1.58	0.212										

En lo que se refiere a la condición estructural, 12 del total de 29 segmentos (50% de la longitud total) presentaron valores de D_0 superiores al límite de intervención. De manera similar, otros trece segmentos (con 46% de la longitud) excedieron o tuvieron valores cercanos al umbral establecido para el *IRI*.

Como consecuencia de las deficiencias en la regularidad, en el programa *CP* contenido en la Tabla 7 se prevé la ejecución de quince obras de fresado y reemplazo adicionales a las trece necesarias al inicio del periodo. Al tomar en cuenta los aspectos estructurales, el programa *REC+CP* convierte en reconstrucciones cinco de los trece fresados iniciales, y contempla seis reconstrucciones adicionales en el primer año y una más en 2024 (ver Tabla 7).

Tramo 3-A

En general, los niveles de *IRI* registrados para este tramo son menores que los del tramo 2 - B, sin embargo, se advierte una zona de alta irregularidad en el inicio que afecta a unos 25 km. Lo anterior, aunado a la evolución natural del *IRI* en el resto del tramo, redundó en un programa *CP* con obras de fresado y reemplazo para todos los tramos en algún año del periodo de análisis, como puede verificarse en la Tabla 8. Incluso, el programa prevé una segunda obra para los segmentos 2, 4, 6, 10 y 12.

En lo que corresponde al programa *REC+CP*, al aplicar el procedimiento de la sección 2, solo se detectaron valores excesivos de D_0 para los segmentos 2, 6 y 18, lo que generó las acciones de reconstrucción que figuran en la misma Tabla 8.

Tabla 8. Programas de obra del tramo 3-A

Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D_0 (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
3A001	4.600	3.16	0.283	FR5									
3A002	3.500	3.36	0.463	FR5							FR5		
				REC									
3A003	0.400	4.40	0.234	FR5									
3A004	4.400	3.66	0.401	FR5								FR5	
3A005	11.800	2.97	0.265	FR5									
3A006	0.100	2.33	0.517	FR5						FR5			
				REC									FR5
3A007	5.200	1.68	0.262							FR5			
3A008	3.300	1.57	0.425						FR5				
3A009	4.600	1.49	0.259								FR5		
3A010	1.200	1.97	0.411			FR5							FR5
3A011	0.200	1.93	0.206					FR5					
3A012	5.800	2.00	0.438			FR5							FR5
3A013	6.800	2.19	0.234			FR5							
3A014	0.500	1.87	0.388				FR5						
3A015	7.800	1.93	0.258				FR5						
3A016	1.900	1.29	0.398								FR5		
3A017	0.600	1.19	0.345									FR5	
3A018	21.000	1.58	0.507	REC				FR5					
3A019	4.800	1.84	0.231					FR5					
3A020	1.500	2.62	0.402	FR5									
3A021	14.500	1.73	0.202							FR5			

Tramo 3-B

En este caso, el proceso de división produjo únicamente los seis segmentos homogéneos que aparecen en la Tabla 9, de los cuales el quinto se generó debido a un cambio de zona climática.

Según la misma tabla, cuatro de los seis segmentos generados, cuyas longitudes representan el 43% de los 104.4 km de longitud total del tramo, tienen indicadores no satisfactorios de capacidad funcional y estructural. Como resultado de lo anterior, se obtuvo un programa CP con un número importante de obras que, además, deben repetirse de dos a cuatro veces en cada segmento, como puede verificarse en la Tabla 9.

Segmento	Long. (km)	IRI (m/km)	D ₀ (mm)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
3B001	3.800	3.47	0.932	FR5			FR5			FR5			FR5
				REC									
3B002	12.400	3.04	0.457	FR5							FR5		
				REC									
3B003	1.100	4.39	0.757	FR5				FR5				FR5	
				REC									
3B004	35.100	2.21	0.366			FR5							
3B005	24.500	1.66	0.366								FR5		
3B006	27.500	3.81	0.876	FR5				FR5				FR5	
				REC									

Al tomar en cuenta el comportamiento estructural, los fresados y reemplazos previstos para el primer año en el programa CP se convierten en obras de reconstrucción, lo que reduce de manera notable la cantidad de reemplazos de carpeta programados en años posteriores. Aún así, con base en los datos proporcionados, el HDM-4 estima que será necesario efectuar reemplazos en el último año del periodo de análisis en los segmentos 2 y 3.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado, pueden formularse las siguientes conclusiones:

- En estudios enfocados en la vertiente técnica de la evaluación de proyectos carreteros, como el descrito en este documento, conviene utilizar la aplicación de análisis de estrategias del HDM-4, ya que es la única con la que se pueden integrar, jerarquizar y optimizar los programas de obra según su contribución a la mejora del estado del pavimento.
- Con este trabajo se ha verificado que los cambios derivados de la debida consideración de la capacidad estructural de los pavimentos se reflejan en aspectos como la naturaleza, cantidad, extensión y año de ejecución de las obras

programadas, los cuales son relevantes en el nivel de red de la gestión de pavimentos.

- En términos generales, se observa que las diferencias entre los programas que omiten o toman en cuenta la capacidad de carga crecen con la magnitud del deterioro estructural. De esta manera, utilizando como métrica el porcentaje de obras de reconstrucción en la solución final, el nivel de las diferencias varió entre 0 (tramo 1-B, en buen estado integral) y 57% (tramo 2-A, con alta incidencia de valores excesivos de D_0).

¿Quieres profundizar?

^[1] J. B. Odoki y H. G. R. Kerali, HDM-4, Highway Development and Management: Volume 4, Analytical Framework and Model Descriptions, vol. 4, París: Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), 2006.

^[2] AASHTO, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993.

^[3] SCT, «N-CSV-CAR-1-03-010-17: Determinación de las deflexiones de un pavimento (DEF),» de *Normativa de la Infraestructura del Transporte*, Ciudad de México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2017.

^[4] C. Gorrostieta, R. Solorio y R. I. Hernández, «Algoritmo para la segmentación de carreteras con base en parámetros de respuesta del pavimento. Informe interno,» Instituto Mexicano del Transporte, San Fandila, Qro., 2008.

^[5] C. R. Bennett, «Sectioning of Road Data for Pavement Management,» de *Sixth International Conference on Managing Pavements: The Lessons, the Challenges, the Way Ahead. Conference Proceedings*, Brisbane, Australia, 2004.



Inspirar todos los días un cambio de ideas no es fácil,
pero empecemos por ser parte de un lugar...

¡Bienvenidos a los asociados AMAAC 2021!

HES LIEC
ASPRO APCL PEPSA

BOWERA INARSA SUCOBSA
QUANTUM ALEATICA HONEYWELL

GREXCON
INGENIERÍA

ININME
MACUSPANA

MULTIPLE
INGENIERÍA

CONSTRUCTORA
SOCOE

CONSTRUCCIONES
BORQUEZ

LABORATORIO
SOLINTICO

HTR
INFRAESTRUCTURA

COMEX DIVISIÓN
PROFESIONAL

ENERGO
ABASTECEDORA

EDUARDO
MACÍAS MARTÍNEZ

DISEÑOS DE INGENIERÍA,
CONTROL Y ASESORÍA

RAÚL ALEJANDRO
MARTÍNEZ MORALES



EN GRUPO SÚRFAX TE AYUDAMOS A REDUCIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE TUS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DURANTE TODA SU VIDA ÚTIL Y MÁS ALLÁ.

Las mezclas asfálticas tibias reducen la emisión de vapores de asfalto durante la pavimentación.

Las carpetas de rodadura SMA prolongan la vida útil del pavimento incluso por arriba de mezclas densas diseñadas bajo SUPERPAVE.

Los pavimentos en optimas condiciones superficiales podrían reducir el consumo de combustible hasta en un 3 por ciento.

Los selladores asfálticos como recubrimiento impermeable son una estrategia efectiva de protección y conservación de pavimentos asfálticos.

Los pavimentos asfálticos son los más silenciosos.

El uso de aditivos promotores de adherencia en carpetas de rodadura es esencial para garantizar su vida útil sin baches o desprendimientos.

Los pavimentos asfálticos requieren el 20% menos energía para producirse y construirse que otros pavimentos.

Los pavimentos asfálticos son 100% reusables y pueden usarse en pavimentos nuevos de alto desempeño.

La pavimentación con asfalto es más rápida, reduciendo congestionamientos.

Las mezclas asfálticas tibias producidas y tendidas a menor temperatura están listas para abrirse al tráfico en menos tiempo.

El sellado de grietas en pavimentos puede extender la vida útil del pavimento de 2 a 6 años.

Con mezclas asfálticas tibias se ahorra energía y se reducen las emisiones de CO₂.

GRUPO
SÚRFAX

Tu socio en Innovación.



Agua Marina No. 3042, Agua Blanca
C.P. 45235, Zapopan Jalisco, México



Tel: +52 33 3684 7304
www.gruposurfax.com.mx

siguenos en redes sociales



Impacto de la adición de aceites vegetales en las propiedades de una combinación de asfalto virgen y asfalto envejecido

María Camila Santos Q.,
mc.santos11@uniandes.edu.co

Diana B. Sánchez,
bo-sanch@uniandes.edu.co

Silvia Caro,
scaro@uniandes.edu.co

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Introducción

El material asfáltico recuperado, conocido a nivel mundial como RAP, por sus siglas en inglés de Reclaimed Asphalt Pavement, es el material resultante de un pavimento flexible que ha llegado al final de su vida útil y que es recuperado para su uso en un nuevo proyecto vial o en procesos de rehabilitación o mantenimiento de proyectos viales existentes. Este material se destaca por proporcionar ventajas en las dimensiones ambiental y económica, al reducir el impacto provocado por la extracción de materiales no renovables, emisiones y gasto energético. De hecho, el empleo de RAP en la construcción o reparación de pavimentos constituye una de las prácticas más comunes para impulsar la sostenibilidad en el área de la infraestructura vial. De acuerdo con un informe publicado por la National Asphalt Pavement Association (NAPA) en el año 2019, durante los años 2009 al 2018 en Estados Unidos se evidenció un incremento del 62.78% en el uso del RAP para la producción de nuevas mezclas asfálticas en caliente.^[1]

Sin embargo, pese a los aspectos positivos de este material, su uso también presenta algunos retos, particularmente cuando se emplean altos porcentajes de este material como parte de la fabricación de nuevas mezclas asfálticas en caliente (i.e., más del 40% sobre peso total de la mezcla).^[2] Dentro de estas desventajas, se destaca un aumento no deseado en la rigidez del material, debido a que el asfalto presente en el RAP ha sufrido procesos de envejecimiento durante su vida útil en servicio. Estos procesos de envejecimiento modifican la composición química del asfalto, principalmente por la generación de grupos carbonilos y sulfóxidos, lo que se traduce en un aumento de la viscosidad y rigidez del material y, por lo tanto, en una mayor susceptibilidad a la fractura, específicamente a la fatiga y al agrietamiento térmico.

Los métodos más empleados para contrarrestar este aumento de rigidez es el empleo de ligantes asfálticos más blandos y la incorporación de rejuvenecedores. Los rejuvenecedores son productos con características físicas y químicas diseñados para contrarrestar el aumento de la rigidez generado por el material RAP, disminuyendo la viscosidad del asfalto envejecido presente en este material y

proporcionando una mejor trabajabilidad en las mezclas finales.^[3] Varios investigadores han evaluado las propiedades reológicas y de desempeño de mezclas asfálticas con rejuvenecedores de diversos tipos, tales como productos provenientes del petróleo y aceites vegetales como aceite de pino, maíz y soya.^[4-10] En general, los resultados de estos estudios muestran que los aceites vegetales son agentes rejuvenecedores efectivos en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas con contenidos significativos de RAP.

Bajo estas consideraciones, el presente artículo busca cuantificar el cambio de indicadores de caracterización tradicionales (penetración y punto de ablandamiento) y de propiedades reológicas de una combinación de asfalto tipo RAP y asfalto virgen que incluye dos diferentes dosis de aceite de palma y uno de sus derivados en el proceso de refinación (i.e. estearina dura), en tres estados de envejecimiento (i.e., estado original o sin envejecer, estado envejecido en el corto plazo y estado envejecido en el largo plazo). La capacidad de estos aceites para actuar como potenciales rejuvenecedores de mezclas asfálticas con altos contenidos de RAP ha sido evaluada en estudios previos, con resultados prometedores.^[11]

Es relevante destacar que este tema es de gran interés en el contexto colombiano, ya que este país es el cuarto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América, con una producción anual de 1,109 toneladas,^[12,13] lo que constituye una excelente oportunidad para darle un uso alternativo a este recurso natural en proyectos viales.

Materiales

En este estudio se utilizó un tipo de asfalto sin modificar y tres rejuvenecedores vegetales. El ligante asfáltico se obtuvo de la refinería de Barrancabermeja (Colombia) y se encuentra clasificado como penetración 60/70 [0.1 mm], y su punto de ablandamiento es de 48 °C. El asfalto tipo RAP, denominado en este

estudio como “asfalto RAP”, fue producido en el laboratorio, después de someter al mismo asfalto virgen de penetración 60/70 a dos procesos sucesivos de envejecimiento. Específicamente, el asfalto fue envejecido en el corto plazo, empleando el ensayo de película delgada en horno (RTFO por sus siglas en inglés, Rolling Thin Film Oven; ASTM D2872), y posteriormente en el largo plazo, empleando el ensayo de envejecimiento en cámara a presión (PAV, por sus siglas en inglés, Pressure Aging Vessel; ASTM D6521). El asfalto virgen y el asfalto RAP fueron empleados para fabricar una combinación de asfalto, denominada “Base”, compuesta por 70% asfalto virgen y 30% asfalto RAP. La combinación de asfaltos “Base” corresponden al asfalto efectivo que se puede esperar en una mezcla asfáltica nueva que incorpore en su diseño un porcentaje de RAP de entre el 40 y el 70% por peso total de la mezcla.^[11]

En cuanto a los aceites rejuvenecedores, se emplearon tres materiales: 1) aceite crudo de palma, denominado “A”; 2) estearina dura, denominado “E” y 3) un rejuvenecedor vegetal de control comercial utilizado en Estados Unidos, denominado “C”. La evaluación del impacto de los rejuvenecedores en los indicadores básicos y en las propiedades reológicas de las combinaciones de asfalto se realizó integrando los rejuvenecedores como reemplazo del peso del asfalto virgen en dos dosis: 3% (dosis baja) y 10% (dosis alta); siguiendo las recomendaciones de estudios previos.^[14] La Tabla 1 presenta los asfaltos y las combinaciones de asfaltos evaluados con las dos dosis de rejuvenecedor, así como las denominaciones de las combinaciones resultantes entre los dos ligantes asfálticos (virgen y RAP) y los aceites vegetales. Estas denominaciones tienen en cuenta el agente rejuvenecedor y su dosis correspondiente. Así, por ejemplo, la denominación “A3” corresponde a una combinación de asfalto virgen, asfalto RAP y aceite tipo “A” añadido en una cantidad del 3% por peso del asfalto virgen.



La Asociación Mexicana del Asfalto A.C.,

te invita a afiliarte como asociado:

Individual **Empresarial** **Adicional**



pregunta por los requisitos y beneficios: vinculacion@amaac.org.mx

☎ 55 5606 7962      @AMAACmx

Tabla 1. Materiales evaluados

Composición	Rejuvenecedor	Dosis de rejuvenecedor por peso de asfalto virgen	Denominación
100% asfalto virgen	N/A	N/A	Virgen
70% asfalto virgen + 30% asfalto RAP	N/A	N/A	Base
67.9% asfalto virgen + 30% asfalto RAP + 2.1% rejuvenecedor	Aceite crudo de palma	3%	A3
	Estearina dura		E3
	Control		C3
63.70% asfalto virgen + 30% asfalto RAP + 6.3% rejuvenecedor	Aceite crudo de palma	10%	A10
	Estearina dura		E10
	Control		C10

Metodología experimental

Con el fin de evaluar el impacto de la incorporación de los aceites vegetales (A, E y C) en la combinación de los asfaltos virgen y RAP, se realizaron los siguientes ensayos: penetración (normativa ASTM D5), punto de ablandamiento (normativa ASTM D36) y ensayos de corte dinámico (DSR) en condiciones de deformación angular controlada empleando la geometría de placas paralelas. Estos ensayos se utilizaron para cuantificar la consistencia de los asfaltos, la tendencia del material a fluir y las propiedades viscoelásticas lineales, respectivamente. Adicionalmente, para estudiar la susceptibilidad de estas combinaciones de ligantes y aceites vegetales al envejecimiento, los ensayos se efectuaron en tres condiciones: 1) original, 2) RTFO y 3) PAV.

Fabricación de las combinaciones de ligantes asfálticos y aceites vegetales

La Figura 1 ilustra el proceso de fabricación de las diferentes combinaciones de ligantes asfálticos y aceites vegetales. En este estudio, estas combinaciones se denominarán VRA (i.e., “V” de asfalto virgen, “R” de asfalto RAP y “A” de aceites vegetales). El proceso de producción de las combinaciones VRA inicia incorporando el rejuvenecedor al asfalto virgen. Estos materiales se mezclan con un agitador mecánico a una velocidad de 1000 rpm durante 30s. Posteriormente, a la mezcla anterior (asfalto virgen y rejuvenecedor) se añade la cantidad de asfalto RAP requerida, y se continúa el proceso de mezclado durante cinco minutos adicionales a 2000 rpm.

Posterior a esta etapa, se procede a envejecer las combinaciones VRA producidas para contar con

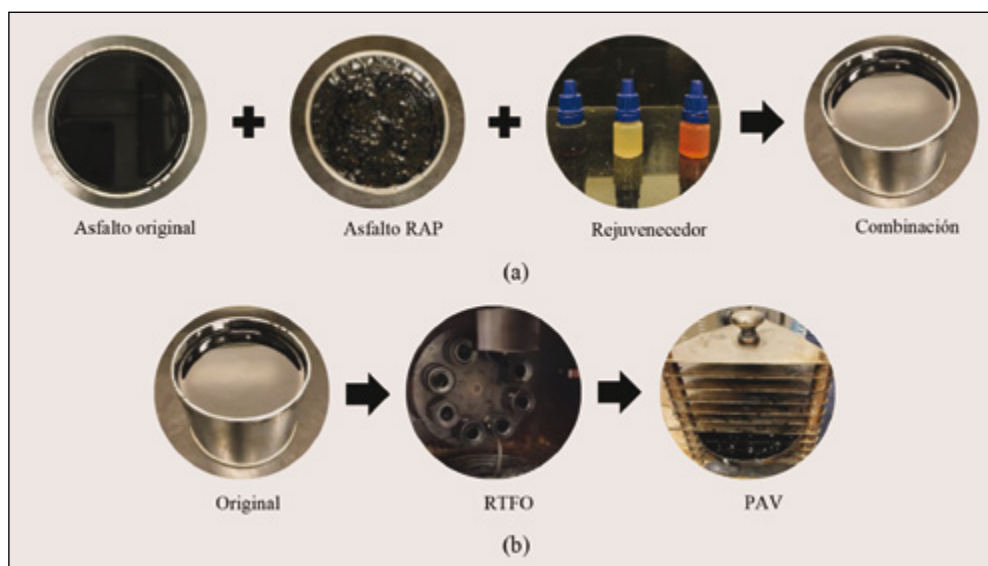


Figura 1. Fabricación de combinaciones: (a) mezclado, y (b) envejecimiento.

muestras en los tres estados de envejecimiento mencionados anteriormente (i.e., original, RTFO y PAV). Una vez se culmina la fabricación de las muestras, estas son empleadas para efectuar los diferentes ensayos experimentales.

Ensayos experimentales

La Figura 2 presenta los ensayos empleados para la evaluación de los materiales VRA en los tres estados de envejecimiento. Como se mencionó anteriormente, los ensayos de penetración y de punto de ablan-

damiento se realizaron siguiendo las normativas ASTM D5 y ASTM D36. La caracterización reológica de los materiales asfálticos, por su parte, se realizó empleando ensayos tipo DSR en un reómetro AR2000ex (TA Instruments) (Figura 2 (c)). Específicamente, los ensayos reológicos consistieron en la aplicación de carga cíclica con una deformación angular constante de 1%, para valores de frecuencias de 0.1 Hz y 30 Hz y de temperaturas 46 °C, 52 °C, 58 °C, 64 °C, 70 °C, 76 °C y 82 °C.

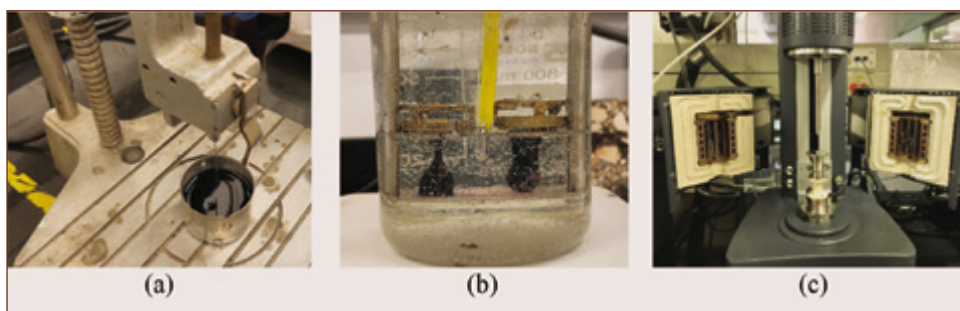


Figura 2. Montajes experimentales (a) penetración, (b) punto de ablandamiento y (c) reómetro de corte dinámico.

Resultados y análisis

Impacto de la adición de aceites rejuvenecedores en la penetración y punto de ablandamiento

En la Figura 3 y en la Figura 4 se presenta una comparación gráfica del impacto de los tipos de aceites y sus dosis en la penetración y en el punto de ablandamiento de las combinaciones de ligantes VRA, en los diferentes estados de envejecimiento.

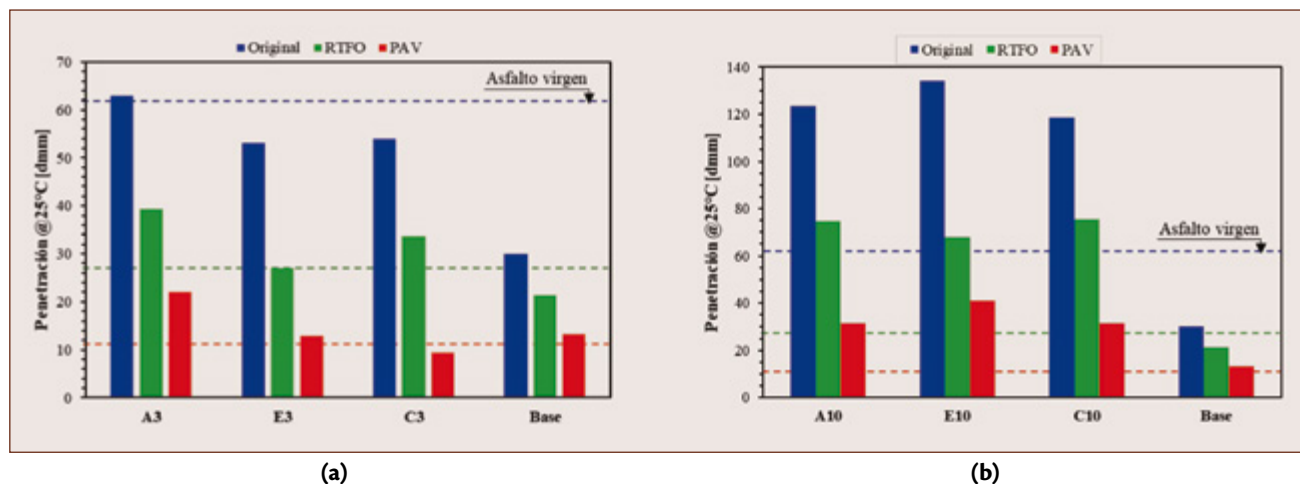


Figura 3. Impacto de los aceites ("C": aceite crudo de palma, "E": estearina dura y "C" rejuvenecedor comercial de origen vegetal) en la penetración, con adición del (a) 3% y (b) 10% por peso del asfalto virgen.

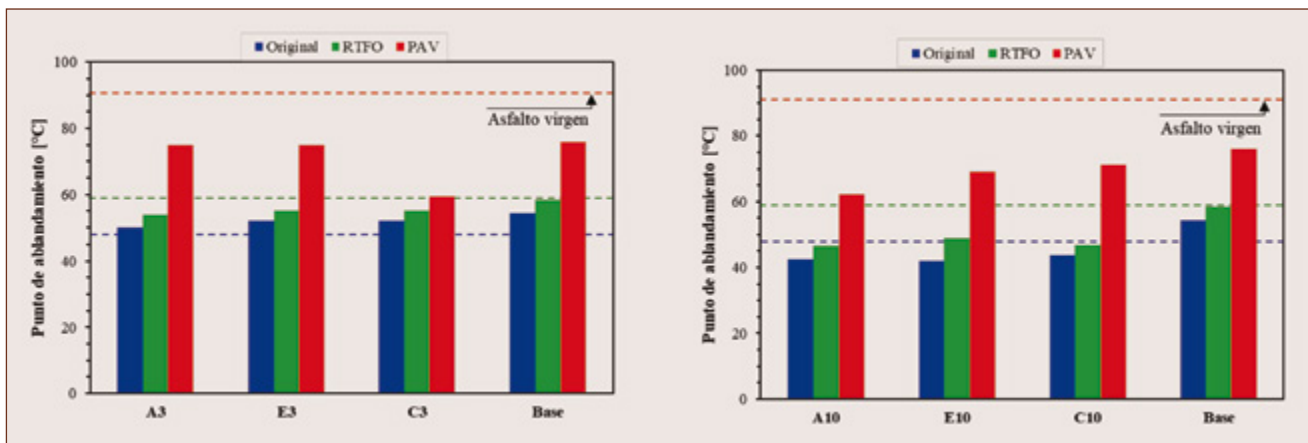


Figura 4. Impacto de la adición de los aceites en el punto de ablandamiento al (a) 3% y (b) 10%.

La Figura 3 muestra que, como era de esperarse, un aumento en la dosis de aceites rejuvenecedores produce un aumento en la penetración de las combinaciones de asfalto virgen y asfalto RAP. Esto significa que los aceites ‘ablandan’ la combinación “Base” de asfaltos. No obstante, dicho efecto de ablandamiento depende del tipo de aceite y del estado de envejecimiento del material.

Específicamente, los resultados muestran que la adición de los aceites en una dosis del 3% a las combinaciones de asfalto virgen y asfalto RAP en estado original, el material A3 es el único que presenta un incremento de la penetración, del 1.6%, con respecto al valor del asfalto virgen. Esto significa que la combinación VRA resultante tiene una consistencia similar a la del asfalto virgen. Por el contrario, los materiales E3, C3 y Base presentan valores de penetración que son 14.5%, 12.9% y 51.6% inferiores, respectivamente, con respecto al asfalto virgen. En el estado RTFO, la combinación E3 presenta la misma penetración del asfalto virgen envejecido a corto plazo, mientras que las combinaciones A3 y C3 tienen valores de penetración que son 45.7% y 24.7% mayores que el asfalto virgen. La penetración de la combinación “Base”, por su parte, es 0.8 veces la del material virgen. Finalmente, en las condiciones de envejecimiento a largo plazo (PAV), la penetración de los materiales E3 y “Base” es 1.2 veces mayor que la penetración del asfalto virgen en el mismo estado, la penetración de la combinación A3 es el doble de la propiedad del material virgen y la del rejuvenecedor de control es 0.8 veces.

Cuando los aceites fueron adicionados al 10% por peso del asfalto virgen, se evidencia que para los materiales A10, E10 y C10 la penetración es mayor a la del asfalto virgen en los tres estados de envejecimiento. Es decir, todas las combinaciones VRA resultaron ser más blandas que el asfalto original. Particularmente, en el estado original, las combinaciones VRA resultan en valores de penetración que son 2, 2.2 y 1.9 veces con respecto al asfalto virgen para los materiales A10, E10 y C10, respectivamente. En el estado de envejecimiento a corto plazo (RTFO) el incremento de la penetración de A10 y C10 es 2.8 veces la del asfalto virgen y la del material E10 es 2.5 veces mayor. Así mismo, en el estado PAV la penetración de los materiales A10 y C10 es 2.9 veces mayor que la del asfalto virgen, mientras que la de E3 es 3.7 veces superior.

Adicionalmente, al comparar las combinaciones con aceites rejuvenecedores con una dosis de 3% con la “Base” (i.e., combinación de asfalto virgen y asfalto RAP sin aceites), las combinaciones A3, E3 y C3, en promedio presentan una penetración que es 1.9 veces inferior en el estado original, 1.6 en RTFO y 1.1 en PAV. En las combinaciones A10, E10 y C10 el promedio de aumento de la penetración con respecto a la Base corresponde a 4.2 veces en estado original, 3.4 en estado RTFO y 2.6 en estado PAV.

En resumen, los resultados demuestran la capacidad de los aceites para disminuir la rigidez de la combinación de asfalto virgen y asfalto RAP, o combinación “Base”. Específicamente, a una misma dosis de adición, el aceite crudo de palma (A) es el que

genera mayores aumentos de la penetración de la combinación “Base” en todos los estados de envejecimiento y el rejuvenecedor de comercial o de control (C) el que genera un menor aumento de este indicador. Así mismo, a una dosis de adición del 3% y estado original, el aceite crudo de palma (A) es el único que resulta en una mezcla con una penetración similar a la del asfalto virgen, mientras que la estearina dura (E) y el rejuvenecedor de control (C) presentan valores de penetración inferiores. El general, el material que resulta más susceptible al envejecimiento en el corto plazo (RTFO) es la estearina dura (E), mientras en el largo plazo el rejuvenecedor de control (C) es el más susceptible, ya que en ambos casos se presentan las menores penetraciones con respecto al asfalto virgen.

En cuanto a la influencia de los rejuvenecedores en el punto de ablandamiento, la Figura 4 evidencia que existe una relación inversa entre esta propiedad y la dosis de rejuvenecedor, como era de esperarse. En comparación con el asfalto virgen, las combinaciones rejuvenecidas con una dosis de 3% presentan un punto de ablandamiento inferior en estado de envejecimiento a corto (RTFO) y largo plazo (PAV), contrario a lo que se observa en el estado original. Específicamente, en estado original los materiales E3 y C3 tienen un punto de ablandamiento 2 °C superior que el del asfalto virgen y la diferencia de la combinación A3 es 4 °C mayor con respecto al asfalto virgen. En el estado RTFO, las combinaciones A3, E3 y C3 presentan un punto de ablandamiento 4 °C menor que el asfalto virgen (59 °C). Así mismo, en estado PAV la diferencia de las combinaciones A3 y E3 corresponde a 16 °C y para C3 a 32 °C. Por lo anterior, se puede concluir que para el punto de ablandamiento, el rejuvenecedor de control (C) es más crítico en estado PAV con una dosis de 3% de rejuvenecedor, pues el material puede fluir a menor temperatura con respecto a los rejuvenecedores vegetales provenientes del aceite de palma y su proceso de refinamiento.

En el caso de las dosis del 10%, los valores del punto de ablandamiento son inferiores con respecto al asfalto virgen. Particularmente, en estado original las combinaciones A10, E10 y C10 presentan una disminución del punto de ablandamiento de 5 °C, 6 °C y 4 °C, respectivamente; en estado RTFO las diferencias corresponden a 12 °C, 10 °C y 12 °C; y en estado PAV a 29 °C, 22 °C y 20 °C. Contrario a los materiales rejuvenecidos con una dosis de 3%, el rejuvenecedor de control (C10) adicionado al 10% es el que resulta en valores de punto de ablandamiento más similares a los del asfalto virgen, debido a que en estado original y PAV presenta una menor disminución del punto de ablandamiento.

En definitiva, los tres aceites (A, E y C) son más susceptibles a fluir a menores temperaturas que las que requiere el asfalto virgen, lo que implica un especial cuidado en la utilización de los asfaltos rejuvenecidos estudiados, debido a que el empleo de estos ligantes en mezclas asfálticas podría aumentar la posibilidad de sufrir deformación plástica o ahuellamiento, en especial si son usados en dosis superiores al 3% por peso del asfalto virgen. En general, las combinaciones VRA con estearina dura (E) se acercan más al comportamiento del asfalto virgen, evidenciando temperaturas superiores a las que fluye el material y el aceite de crudo (C) presenta un comportamiento más crítico en lo que respecta al punto de ablandamiento, pues fluye a temperaturas más bajas.

Los resultados de penetración y punto de ablandamiento, demuestran que, aunque la dosis de adición de los aceites sea la misma, la capacidad de estos aditivos para recuperar las propiedades de penetración y punto de ablandamiento de

la mezcla con asfalto envejecido tipo RAP es distinta. Esto justifica la necesidad de definir una dosis óptima de dosificación para cada tipo de rejuvenecedor, con el objetivo de no comprometer desempeño por ahuellamiento o fatiga de mezclas asfálticas fabricadas con RAP.

Impacto de la adición de aceites rejuvenecedores en el módulo dinámico al corte

El módulo dinámico al corte $|G^*|$ es una propiedad reológica fundamental que caracteriza la respuesta a la deformación de un material asfáltico, en función de la temperatura y velocidad de aplicación de carga. En la Figura 5 se presentan algunos resultados de $|G^*|$ obtenidos como resultado de ensayos de barrido de frecuencias y temperatura. Concretamente, se seleccionaron datos a una única temperatura (48 °C) y dos frecuencias de aplicación de carga (1 Hz y 10 Hz), con el objetivo de analizar la variación de $|G^*|$.

Para la dosis de 3%, tanto a la frecuencia de 1 Hz como 10 Hz, las combinaciones A3 y E3 en estado original y RTFO presentan un módulo mayor al del asfalto virgen, pero en estado PAV ocurre lo contrario, siendo las combinaciones de aceite crudo (A3) las que presentan una menor diferencia en el estado original (43%) y RTFO (8%), mientras que la estearina dura (E3) presenta las menores diferencias con el módulo del asfalto virgen en condiciones PAV (11%). El rejuvenecedor de control (C3), por el contrario, es el que presenta un mayor valor de módulo con respecto al ligante virgen.

En la dosis del 10%, las combinaciones VRA se comportan con la misma tendencia a las dos frecuencias (1 Hz y 10 Hz), puesto que el valor de $|G^*|$ es menor que el valor del asfalto virgen en las combinaciones A10 y C10 para todos los estados de enve-

jecimiento evaluados, mientras que para el material E10 el $|G^*|$ es menor que $|G^*|$ del asfalto de control en estado original y PAV, pero aumenta en estado RTFO. La mayor disminución del módulo con respecto al asfalto virgen se presenta en el aceite crudo de palma, el cual 61%, 77% y 82% inferior en estado original, RTFO y PAV que el módulo del asfalto virgen en los mismos estados.

Los resultados obtenidos permiten medir el impacto que tienen el tipo de aceite y su dosis en el módulo dinámico al corte en diferentes estados de envejecimientos y, por lo tanto, en combinación con algunos resultados obtenidos en la sección anterior, se podrían emplear como guía para identificar dosis “óptimas” que permita que las combinaciones VRA tengan un comportamiento apropiado a través del tiempo, cuando se empleen para la fabricación de nuevas mezclas asfálticas. Específicamente, los datos de la Figura 5 sugieren que las combinaciones con una dosis de 3% de rejuvenecedor presentan un $|G^*|$ similar al del asfalto virgen, mientras que las combinaciones con una dosis del 10% el módulo es mucho menor, lo que significa que con dosis altas se aumenta la probabilidad de que los materiales presenten deformaciones plásticas mayores a las de un asfalto convencional. Por lo cual, una dosis cercana al 3% para estos aceites parece apropiada para producir materiales con $|G^*|$ similares al de un asfalto virgen. Finalmente, es de destacar que los resultados de módulo son cualitativamente consistentes con la mayoría de resultados de penetración y punto de ablandamiento reportados en la sección anterior. Sin embargo, dado que a diferencia de la penetración y el punto de ablandamiento el módulo al corte es una propiedad fundamental de un ligante asfáltico, se prefieren estos resultados para analizar el efecto que tienen el tipo de aceites y sus dosis de adición en la respuesta de mezclas VRA.

Síguenos en redes sociales:



#EligeAsfalto

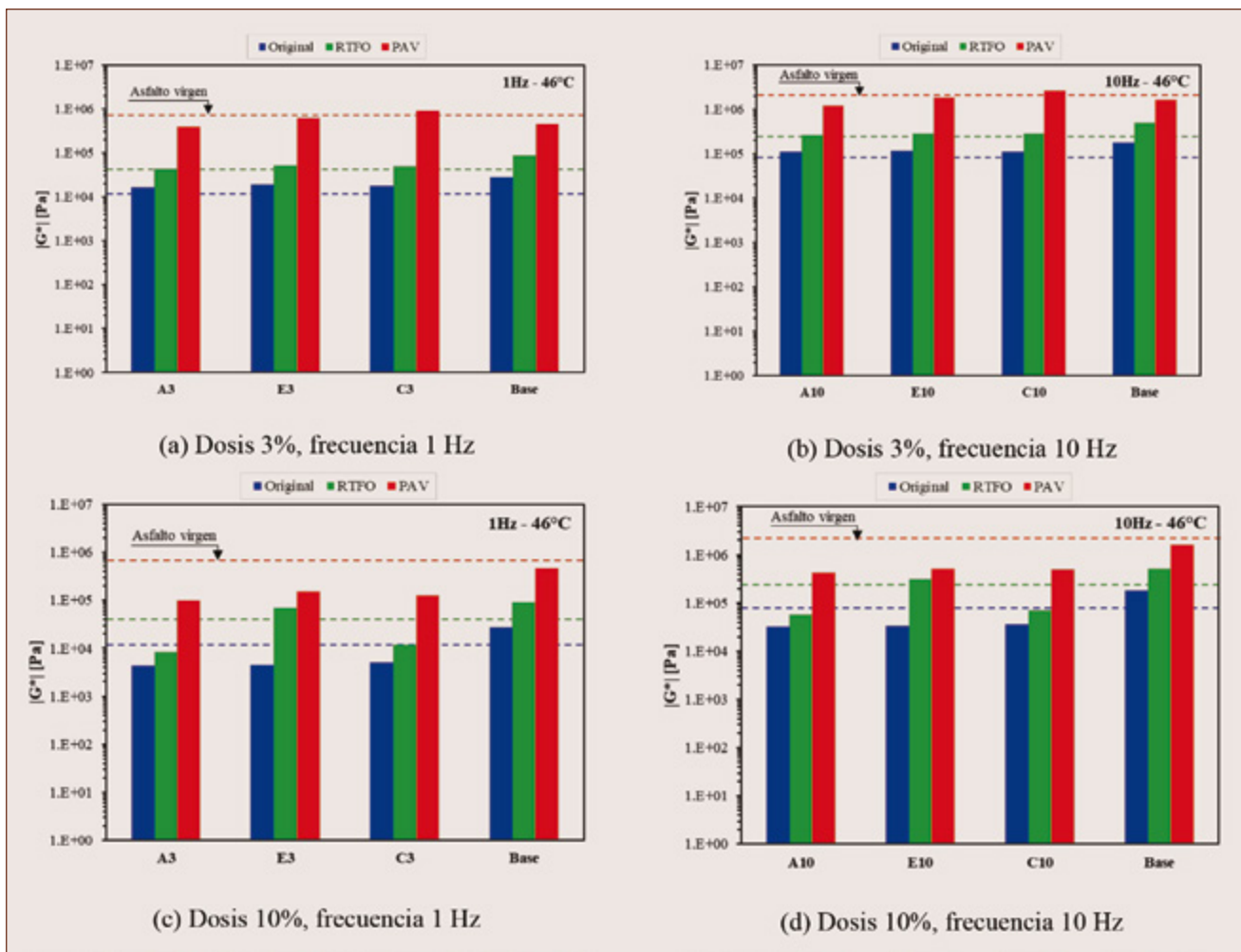


Figura 5. Impacto de los rejuvenecedores en el módulo de corte complejo a 46 °C.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es medir el impacto de la adición de aceites vegetales en los indicadores de penetración y punto de ablandamiento y en el módulo dinámico al corte ($|G^*|$) de una combinación de asfalto virgen y asfalto envejecido tipo RAP. Para esto, se emplearon tres tipos de aceites vegetales (i.e., aceite crudo de palma, estearina dura y aceite de origen vegetal de uso comercial) en dos dosis distintas (3 y 10% por peso de asfalto virgen). Las combinaciones de ligantes asfálticos con aceites fueron evaluados en tres estados distintos de envejecimiento: 1) original, 2) RTFO y 3) PAV. Las siguientes, son las principales conclusiones del estudio:

- El impacto de la adición del aceite crudo de palma y la estearina dura en la penetración de las combinaciones VRA es similar al que resulta cuando se emplea el rejuvenecedor de control, lo que implica que estos materiales podrían ser empleados como rejuvenecedores, pues aumentan la penetración de la combinación “Base” (asfalto virgen y asfalto RAP sin aceites) y logran magnitudes de penetración similares a la de un asfalto virgen, cuando son adicionadas en dosis cercanas al 3%.

- Con respecto al punto de ablandamiento, se observa que dosis iguales o superiores a 3% resultan en combinaciones de ligantes susceptibles a fluir en condiciones de temperatura más bajas que las requeridas en el asfalto virgen, lo que puede traer implicaciones negativas en la resistencia del material a la deformación plástica. Esto sugiere que los valores “óptimos” de adición deberían ser cercanos o inferiores a dicho porcentaje.
- La evaluación del módulo $|G^*|$ confirma que la adición de los aceites en dosis de 10% es excesiva, porque producen materiales con rigideces muy reducidas, mientras que las combinaciones con dosis bajas (3%) presentan comportamientos similares a las del asfalto virgen.
- La adición del aceite crudo de palma y la estearina dura a combinaciones de asfalto virgen y

asfalto RAP puede, dependiendo de la dosis, producir mezclas de ligantes asfálticos con propiedades de penetración, punto de ablandamiento y módulo dinámico similares a las de un asfalto virgen, además de desempeñar una función análoga a la de un rejuvenecedor de control empleado comercialmente en Estados Unidos. Esto confirma el potencial uso de estos aceites como rejuvenecedores.

En una etapa posterior del estudio, se propondrá una metodología para la determinación de la dosis óptima de cada aceite rejuvenecedor que incluya una evaluación del desempeño esperado de las combinaciones VRA frente a la fatiga y a la deformación plástica de estos materiales a lo largo de su vida útil de servicio.



¿Quieres profundizar?

- [1] Williams, B. A., Willis, J. R., & Ross, T. C. (2019). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage:2018. Information Series 138 (9th edition). National Asphalt Pavement Association, Greenbelt, MD, 2019.
- [2] Pedraza, A., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Pouget, S. (2019). 3D Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures containing high content of multi-recycled RAP. Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1594054>
- [3] Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y. R., & Aragão, F. T. S. (2017). Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101>
- [4] Ji, J., Yao, H., Suo, Z., You, Z., Li, H., Xu, S., & Sun, L. (2017). Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders. Journal of Materials in Civil Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001769)
- [5] Haghshenas, H. F., Nabizadeh, H., & Kim, Y.-R. (2016). The Effect of Rejuvenators on RAP Mixtures: A Study Based on Multiple Scale Laboratory Test Results. <https://doi.org/10.1061/9780784480137.066>
- [6] Haghshenas, Hamzeh F., Kim, Y.-R., Morton, M. D., Smith, T., Khedmati, M., & Haghshenas, D. F. (2018). Effect of Softening Additives on the Moisture Susceptibility of Recycled Bituminous Materials Using Chemical-Mechanical-Imaging Methods. Journal of Materials in Civil Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002405](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002405)
- [7] Bailey, H. K., & Zoorob, S. E. (2012). The Use of Vegetable Oil as a Rejuvenator for Asphalt Mixtures. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- [8] Hugener, M., Partl, M. N., & Morant, M. (2014). Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators. Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.860910>
- [9] Yin, F., Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., & Epps Martin, A. (2017). Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents. Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389074>
- [10] Arafat, S., & Wasiuddin, N. M. (2019). A comparative study between the effectiveness of a softer grade binder and a rejuvenating agent in hot mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology - Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482476.009>
- [11] Sánchez, D., Caro, S., & Alvarez, A. (2020). Determining optimum doses of palm oil rejuvenators for recycled blends. En Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II (pp. 339–342). <https://doi.org/10.1201/9781003027362-79>
- [12] Fedepalma. (2019). La Palma de aceite en Colombia. La Palma de aceite en Colombia.
- [13] González-Cárdenas, A. (2016). La agroindustria de la palma de aceite en América. Revista Palmas.
- [14] Arámbula-Mercado, E., Kaseer, F., Epps Martin, A., Yin, F., & García Cucalon, L. (2018). Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. Construction and Building Materials, 158, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.024>

El diseño balanceado y el efecto del rejuvenecedor en mezclas asfálticas en caliente con RAP

Daniela Bocanegra Martínez,
dbocanegra@kao.com
Leonardo Ambrosio Ochoa Ambriz
lochoa@kao.com
Raymundo Benítez López
rbenitez@kao.com
Quimi-Kao, El Salto, Jalisco, México

Introducción

El sistema vial es uno de los activos principales para la sociedad, pues permite aumentar la productividad y conducir al crecimiento económico. Es por ello que resulta indispensable conservar, rehabilitar y reconstruir la red carretera cuidando aplicar criterios de sustentabilidad adecuados, ya que la preservación de los recursos naturales se ha convertido en una preocupación general dentro del sector productivo. Ante este desafío, la industria de la construcción ha implementado técnicas para la reutilización de los materiales generados por los mismos procesos constructivos, tomando en cuenta que la mayoría pueden aprovecharse.^[1]

Siguiendo estos objetivos, la técnica del reciclado de pavimentos ha tomado importancia con el propósito de alargar el ciclo de vida de los materiales.

El reciclado de pavimentos es el proceso en el que los materiales recuperados de pavimentos deteriorados se combinan con nuevos materiales (agregados vírgenes, cemento asfáltico y agentes rejuvenecedores), en las proporciones adecuadas para producir mezclas que cumplan con la calidad requerida.^[2] Generalmente, las exigencias para mezclas recicladas demandan un comportamiento similar al que presentan las mezclas convencionales, sin embargo, pocas ocasiones se toman en cuenta factores importantes para su comportamiento como la rigidización excesiva debida al endurecimiento del asfalto envejecido que contiene el material recuperado (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP), lo que provoca que las mezclas recicladas sean potencialmente frágiles.^[3,4,5]

Para contrarrestar este defecto, como opción se han utilizado cementos asfálticos modificados blandos, o bien, el uso de aditivos rejuvenecedores también puede mejorar el comportamiento de las mezclas recicladas.

Los aditivos rejuvenecedores, son materiales orgánicos que restauran el asfalto envejecido del RAP y eso favorece a alcanzar las características óptimas de la mezcla para su uso final. Los rejuvenecedores son capaces de alterar la viscosidad del asfalto envejecido en el RAP al nivel deseado y, además, mejoran la trabajabilidad de la mezcla y la hacen más resistente al agrietamiento. Los aditivos rejuvenecedores se utilizan para ralentizar el endurecimiento del asfalto, como un antioxidante para contrarrestar los cambios producidos por el envejecimiento del cemento asfáltico en el RAP, como la rigidez, ductilidad y adherencia. En general, el uso del RAP en mezclas asfálticas conduce a una mejora significativa en las propiedades mecánicas, sin embargo, es importante prestar atención en la cantidad óptima de RAP y de rejuvenecedor pues el grado en que este se añade

dependerá de las propiedades del RAP, principalmente del cemento asfáltico envejecido. La combinación adecuada, en la proporción correcta de los componentes de una mezcla reciclada (agregado, asfalto, RAP y aditivos) es la meta principal para asegurar resultados favorables en pruebas de desempeño que demuestren que este tipo de mezclas son comparables con mezclas vírgenes y es mediante el uso del diseño balanceado,^[6] que es posible simular su comportamiento ante pruebas que supongan diferentes deterioros como son la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga.

Objetivos

Identificar el impacto del porcentaje de aditivo en las propiedades resistentes de mezclas asfálticas en caliente recicladas, evaluando la resistencia a la deformación permanente (rodera) y agrietamiento haciendo uso del diagrama de diseño balanceado (I-BMD) para discernir entre la calidad de las mezclas.

Basados en el desempeño de las mezclas se buscó, además, correlacionar los resultados obtenidos en las pruebas de agrietamiento para definir cuál de ellas representa claramente el fenómeno de acuerdo con la sensibilidad a los cambios en las mezclas analizadas.

Alcances

Acorde con el objetivo planteado, el plan experimental se desarrolló en cuatro etapas:

La primera fase se dedicó a la caracterización del cemento asfáltico extraído del RAP y el asfalto de aporte. Con el propósito de restablecer las propiedades del asfalto envejecido del RAP, fue preciso combinarlo con un asfalto más blando, para lo cual se utilizaron cuatro aditivos rejuvenecedores incorporados directamente en el asfalto de aporte. En primer lugar, el RAP se sometió a un proceso de extracción centrífuga con disolventes para posteriormente recuperar el asfalto envejecido por destilación conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM 2172 *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. A continuación, se determinaron las pro-

piedades reológicas del asfalto RAP y del asfalto de proyecto, basadas en la temperatura crítica de falla en el DSR en condición original (HPG); con estos datos se calculó el porcentaje inicial de aditivo rejuvenecedor necesario para contrarrestar la rigidez del RAP mediante el uso de las fórmulas propuestas por el documento más reciente del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

Posteriormente se diseñaron diecinueve mezclas asfálticas designadas como “Primer Conjunto”, de las cuales tres fueron las mezclas de control, referidas como mezcla virgen (sin RAP), 20% RAP y 40% RAP. El porcentaje de RAP se expresó respecto al peso total de la mezcla. El resto de las mezclas analizadas fueron combinaciones basadas en el contenido de aditivo rejuvenecedor, es decir, se aplicaron dos porcentajes de acuerdo con lo obtenido en la primera fase, modificando directamente el asfalto de aporte. Se utilizaron además agregados pétreos de la misma fuente y energía de compactación (125 giros) igual para todas las mezclas, siguiendo el método de diseño descrito en la norma AASHTO M323 *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. La estructura granulométrica para las diferentes variaciones se hizo coincidir con la distribución de agregado de la mezcla control con el objetivo de mantener igualdad de condiciones.

Como tercera etapa, ya con las fórmulas de trabajo definidas se fabricaron los especímenes de prueba necesarios para la determinación de la resistencia a la deformación permanente y potencial de agrietamiento de cada una de las mezclas. Estas propiedades se evaluaron a partir del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (HWTT) y las pruebas I-FIT e IDEAL-CT. Con base en los datos obtenidos, se utilizó el diagrama de interacción de desempeño como herramienta de análisis para identificar la calidad de las mezclas asfálticas con RAP y desde esta perspectiva, optimizar el contenido de aditivo rejuvenecedor.

La cuarta fase del estudio se enfocó en establecer una correlación para las pruebas I-FIT e IDEAL-CT y de esta manera definir cuál ensayo presenta mayor sensibilidad a los cambios en la composición de las mezclas asfálticas con RAP y aditivo rejuvenecedor.

Por último, se hizo un segundo análisis utilizando cemento asfáltico modificado con polímero, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. Esta ocasión, se definieron contenidos de RAP

ADQUIERE TU TREN DE PAVIMENTACIÓN



PAVIMENTADORA CAT
AP355F



COMPACTADOR NEUMÁTICO
CAT CW16



COMPACTADOR DOBLE
RODILLO CAT CB7

COBERTURA

24 MESES
DE GARANTÍA
/ 3,000 HORAS

PÓLIZA MANTENIMIENTO
PREVENTIVO DE 2,000 HORAS

+

FINANCIAMIENTO:

24 MESES + **0%** INTERÉS + **15%** ENGANCHE

MÁS INFORMACIÓN



Contáctanos
800-926-2347 | www.madisa.com

    /MadisaCat

MADISA 

☎ 462 623 1370

@ ventas@asfaltos.mx

📍 Paseo de la Altiplanicie #11
Torre Wolken, 3er Piso Int.C
Villas de Irapuato, Irapuato,
Guanajuato, México. C.P. 36670

Combustibles alternos

Asfaltos

Emulsiones

MISIÓN

Ofrecer a nuestros clientes certidumbre en el suministro, confianza en la entrega y calidad en los productos asfálticos y combustibles que requiere el mercado de la construcción de pavimentos y la industria en general de nuestro país

- Intercambiadores de calor
- Calentadores de aceite térmico
- Tuberías y forros térmicos
- Proyectos llave en mano
- Tanques fijos y móviles para almacenar asfalto
- Silos para almacenamiento de mezclas asfálticas
- Plantas para fabricación de asfaltos modificados
- Plantas para fabricación de emulsiones



Somos una empresa líder en México en la aplicación de Diseño y Tecnología para la fabricación de equipos especializados para la industria del asfalto y sus derivados. Innovamos constantemente para estar a la vanguardia con altos estándares de calidad.



Tel. (52) 462-623-1391

ventas@tanquesyremolques.mx

Paseo de la Altiplanicie 11, Torre Wolken
3-C Irapuato, Guanajuato C.P. 36670

www.tanquesyremolques.mx

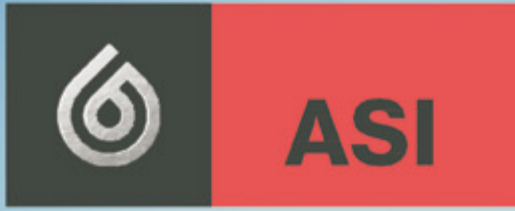
UNA NUEVA VIDA,
PARA UN LARGO CAMINO



neotechasphalt.mx **Tel: (464) 119 8555**


NEOTECH
ASPHALT

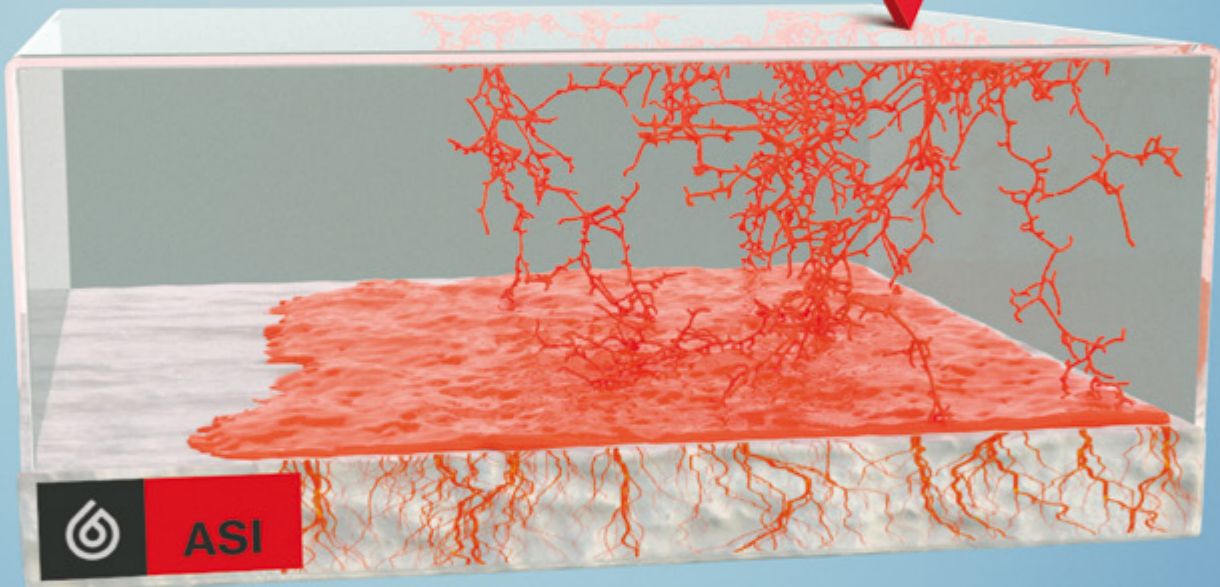
REVITALIZADOR



RIEGO DE
PROTECCIÓN

CONSERVACIÓN OPORTUNA, EFECTIVA,
ECONÓMICA Y SEGURA DE CARPETAS ASFÁLTICAS

El producto penetra las capas internas de la carpeta
prolongando su vida útil



experiencia aprobada y comprobada
POR MÁS DE 30 AÑOS

www.pbi.mx

Tel. 5556992900



Whatsapp: 55 3564 9272



ventas@pbi.mx



diferentes: 20% y 30% y se utilizaron los dos aditivos rejuvenecedores que tuvieron mejor desempeño en la primera serie de experimentos. Nuevamente se clasificaron las mezclas de acuerdo al comportamiento mecánico que presentaron. Las características de este conjunto de mezclas serán nombradas como “Segundo Conjunto”.

Materiales y métodos

Para el estudio se utilizaron materiales provenientes de bancos localizados en el estado de Jalisco y cemento asfáltico tomado de la refinera de Salamanca, Guanajuato.

Agregados pétreos

Los agregados minerales de naturaleza basáltica y producto de trituración corresponden a sello (3/8”)

y arena triturada de cono. Los pétreos cumplen con todas las propiedades físicas y resistentes de los agregados para mezclas de alto desempeño.

Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

El RAP utilizado en el Primer Conjunto de experimentos proviene de los trabajos de fresado ejecutados en las diferentes obras de la Zona Metropolitana de Guadalajara y consiste en la combinación de dos fracciones (RAP grueso y RAP fino), mientras que el material recuperado para el Segundo Conjunto procede de los trabajos de reconstrucción de la carretera federal Guadalajara-Colima 54D, el cual tiene una sola curva granulométrica que se ajustó después de eliminar las partículas que significaban un sobretamaño. Las características más importantes se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del pavimento asfáltico recuperado (RAP)

Material RAP Primer Conjunto										
Propiedad				Método de ensayo				Resultado		
Contenido de asfalto, %				ASTM D2172				(6.7 F/ 4.1 G)		
Distribución granulométrica - AASHTO T27										
Designación	3/4"	1/2"	3/8"	Núm. 4	Núm. 8	Núm. 16	Núm. 30	Nú m. 50	Núm. 100	Núm. 200
% Pasando (RAP Fino)	100	100	100	100	89.9	60.6	36.8	26.4	14.8	10.2
% Pasando (RAP Grueso)	100	100	99	51.8	25.7	16.1	12.2	10.3	7.2	4.9
Reómetro de Corte Dinámico (DSR) - AASHTO T315										
Asfalto RTFO										
T. crítica de falla [°C]:				107.10						
Material RAP Segundo Conjunto										
Propiedad				Método de ensayo				Resultado		
Contenido de asfalto, %				ASTM D2172				5.6		
Distribución granulométrica - AASHTO T27										
Designación	3/4"	1/2"	3/8"	Núm. 4	Núm. 8	Núm. 16	Núm. 30	Nú m. 50	Núm. 100	Núm. 200
% Pasando	100	96.5	89.5	66.7	49.9	38.8	26.3	18.8	12.5	6.5
Reómetro de Corte Dinámico (DSR) - AASHTO T315										
Asfalto RTFO										
T. crítica de falla [°C]:				114.75						

*F = RAP Fino, G = RAP Grueso

Cemento asfáltico

Como ya se mencionó anteriormente, se utilizaron dos tipos de asfalto base. Para el Primer Conjunto de experimentos, las mezclas fueron fabricadas con un cemento asfáltico EKBÉ® PG 64-22, mientras que para el Segundo Conjunto de mezclas se empleó un asfalto modificado con polímero SBS (estireno butadieno estireno), cuyo grado de desempeño lo clasificó como un PG 76-22. En la Tabla 2 se presentan las temperaturas críticas de falla utilizadas en las ecuaciones para el cálculo de la dosis inicial de aditivo.

Tipo de cemento asfáltico	Temperatura crítica de falla (° C)
Original	69.73
Modificado	80.45

Para los asfaltos de proyecto, se calculó la cantidad necesaria de aditivo rejuvenecedor para cumplir con el grado de desempeño objetivo a través de las fórmulas recomendadas por el NCHRP (2020) para calcular el porcentaje inicial de aditivo de acuerdo con la cantidad de RAP que se agrega a la mezcla.

Se prepararon muestras de asfalto base con 10% de cada uno de los rejuvenecedores a evaluar, de modo que es posible calcular la eficiencia de cada aditivo de acuerdo con la tasa de reducción del grado PG a alta temperatura (PGH) por dosis de rejuvenecedor al 1%. Este valor será utilizado para el cálculo del porcentaje inicial de rejuvenecedor que corresponderá a la dosis baja que se aplicó a los asfaltos base; enseguida se consideró como dosis alta el porcentaje correspondiente a dos veces la dosis inicial. En la Tabla 3 se muestran dos ejemplos para el cálculo de la eficiencia de los aditivos.

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:

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

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

$$\% \text{ Inicial de aditivo rejuvenecedor} = (PG_{Blend} - PGH_{Target}) / (EF_{AR}) \quad (3)$$

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:

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

Donde:

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

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

Tabla 3. Ejemplos del efecto de la eficiencia de los aditivos

Tipo de cemento asfáltico	Temperatura crítica de falla (° C)
Asfalto base (Modificado)	80.45
Asfalto base (Modificado) + 10% R. I*	56.20
Asfalto base (Modificado) + 10% R. II*	60.18
Eficiencia del R. I	2.43
Eficiencia del R. II	2.03

*R. I= Rejuvenecedor I, R. II= Rejuvenecedor II

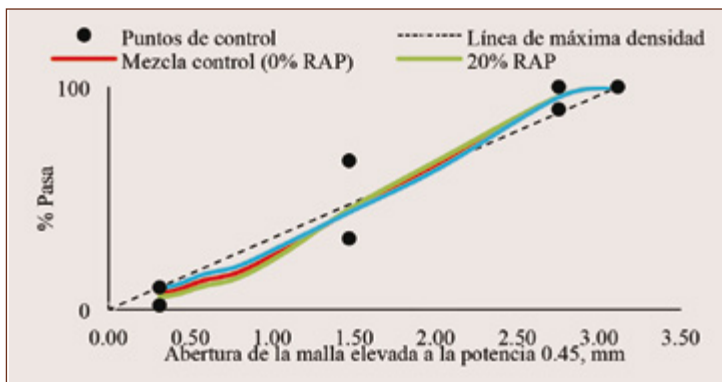
Como se puede observar en los resultados anteriores, la eficiencia de cada aditivo es distinta, debido a que por su estructura química cambia la efectividad cuando actúan con el cemento asfáltico. Por la razón anterior, se seleccionaron los porcentajes de aditivo más altos con el propósito de manejar una dosis inicial igual para todas las mezclas. Es importante recalcar que con la dosis de rejuvenecedor que se añade al asfalto base se pretende obtener el grado PG del mismo asfalto base una vez que es combinado con el cemento asfáltico que contiene el RAP, por lo que las formulaciones anteriores implícitamente deducen este efecto, lo cual, anteriormente era calculado a través de cartas de mezclado.

Diseño 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.

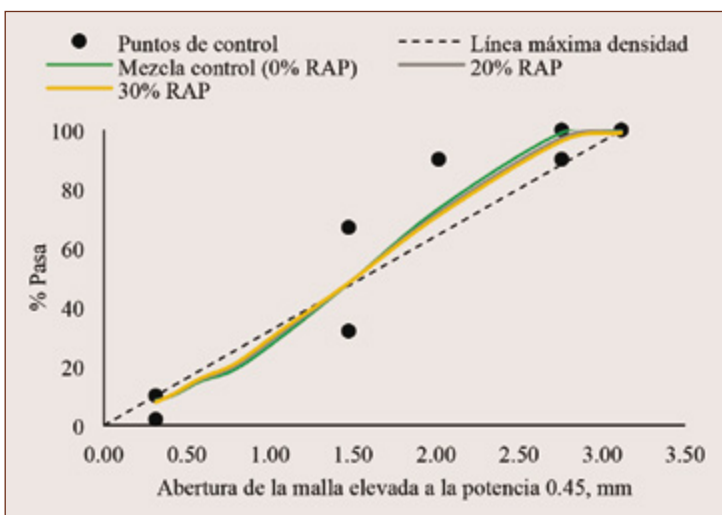
Se determinó el contenido de asfalto para cada una de las mezclas control (sin aditivo) con el objetivo de alcanzar un volumen de vacíos de aire de $4\% \pm 0.5$, posteriormente estos contenidos fueron utilizados también para la fabricación de especímenes con aditivo rejuvenecedor.

La Figura 1 y Figura 2 ilustran las granulometrías que forman el esqueleto mineral de las mezclas fabricadas y se presentan las propiedades volumétricas y sus características.



Propiedad	Valor reportado
% Va	4%
Giros de diseño	125
%CA Total mezcla control	7.7
%CA Total mezcla 20%RAP	6.4
%CA Total mezcla 40%RAP	6.2

Figura 1. Distribuciones granulométricas ajustadas a los puntos de control para T.N 1/2 y características de las mezclas del "Primer Conjunto".



Propiedad	Valor reportado
% Va	4%
Giros de diseño	125
%CA Total mezcla control	7
%CA Total mezcla 20% RAP	6.9
%CA Total mezcla 30% RAP	6.6

Figura 2. Distribuciones granulométricas ajustadas a los puntos de control para T.N 3/8 y características de las mezclas del "Segundo Conjunto".

Propiedades mecánicas

Se evaluó la propensión a la deformación permanente y el fenómeno de agrietamiento para medir el desempeño mecánico de las mezclas analizadas. Para el primer parámetro se utilizó la rueda cargada de Hamburgo y para el segundo factor se determinó el índice de flexibilidad (FI) y el índice de agrietamiento (CT index) a través del ensayo semicircular SCB I-FIT e IDEAL-CT 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% ± 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 170 °C ± 5 y 155 °C ± 5 respectivamente para todas las mezclas con y sin rejuvenecedor.

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".

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 y la tenacidad a través del cálculo de la energía disipada durante el proceso de fractura por flexión en probetas semi-circulares 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^[7] propuso utilizar mínimo “7” cuando se añade RAP en las mezclas asfálticas.

Índice de agrietamiento (CT index)

El ensayo IDEAL-CT (Indirect tensile asphalt cracking test) se ejecuta sobre probetas cilíndricas a las condiciones de carga, temperatura y geometría que señala la especificación ASTM D8225-19 “*Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*”, cuyo propósito es obtener un parámetro de agrietamiento (CT index) a partir de una curva de carga-desplazamiento, el área bajo la curva generada de la misma (conocida como energía de fractura), la pendiente post-pico y la deformación generada al 75% de la carga pico, de tal forma que es posible determinar la resistencia al agrietamiento de las mezclas a una temperatura intermedia que puede variar en un rango de 5 °C a 35 °C. Actualmente no existe un valor definido de índice de agrietamiento para considerar que una mezcla es resistente a este tipo de deterioro, sin embargo, diversos estudios sugieren utilizar “70” como valor mínimo de referencia.^[8]

Diseño Balanceado

El diagrama de interacción del desempeño consiste en adoptar dos parámetros medidos en laboratorio que simulen los deterioros relacionados con deformación permanente y agrietamiento que se presentan en un pavimento. La meta del diseño balanceado (BMD por sus siglas en inglés) es obtener una fórmula de trabajo cuyas proporciones de pétreos, cemento asfáltico y otros elementos aseguren resultados de desempeño favorables.^[9]

Resultados

Esta sección incluye los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos a los que fueron sometidas las mezclas. Se muestra además la aplicación de los mismos en el diagrama de diseño balanceado para realizar la comparación del desempeño entre los conjuntos de mezclas.

Para el análisis de interacción del desempeño, se obtuvo por un lado el valor promedio de la deformación generada en los especímenes de prueba una vez ejercido el peso de las ruedas al cumplirse 20 mil pasadas, por otro lado, el potencial de agrietamiento representado por el índice de flexibilidad (FI).

Los resultados del Primer Conjunto de experimentos son resumidos en la Tabla 4 y enseguida se presenta su diagrama de diseño balanceado.

Tabla 4. Resultados de las pruebas mecánicas del Primer Conjunto.

		Designación de la mezcla	HWTT (mm) ≤ 12.5 mm @ 20 000 pasadas	IDEAL CT CT Index	I-FIT FI (mín. 7)
Mezclas control		Mezcla virgen	22.93	281.39	8.57
		20% RAP	5.60	50.58	1.95
		40% RAP	1.66	18.42	1.28
Dosis baja de Aditivo Rejuvenecedor	4.5%	20% RAP + Rejuvenecedor I	5.87	80.59	7.6
		20% RAP + Rejuvenecedor II	6.50	80.71	5.3
		20% RAP + Rejuvenecedor III	4.88	50.86	3.62
	6.0%	20% RAP + Rejuvenecedor IV	7.18	97.62	3.99
		40% RAP + Rejuvenecedor I	3.48	29.22	2.7
		40% RAP + Rejuvenecedor II	6.42	41.65	2.38
Dosis alta de Aditivo Rejuvenecedor	9.0%	40% RAP + Rejuvenecedor III	7.22	45.36	2.48
		40% RAP + Rejuvenecedor IV	5.36	37.64	2.55
		20% RAP + Rejuvenecedor I	27.95	94.27	10.12
	12.0%	20% RAP + Rejuvenecedor II	25.24	77.65	7.75
		20% RAP + Rejuvenecedor III	30.73	88.83	8.42
		20% RAP + Rejuvenecedor IV	37.08	111.8	9.25
12.0%	40% RAP + Rejuvenecedor I	19.83	104.58	5.34	
	40% RAP + Rejuvenecedor II	6.01	46.26	3.38	
	40% RAP + Rejuvenecedor III	23.26	58.33	3.91	
		40% RAP + Rejuvenecedor IV	10.5	47.13	3.56

Resulta clara la disminución de la deformación plástica cuando se añade RAP a las mezclas y al utilizar asfaltos de proyecto con dosis baja de aditivo presentaron un desempeño adecuado cumpliendo con los valores estándares especificados para este tipo de deterioro, sin embargo, al incorporar aditivo rejuvenecedor en dosis altas, la profundidad de rodera crece hasta superar el valor obtenido en las mezclas control excepto para el caso de los aditivos rejuvenecedores II y IV con 40% de RAP. El efecto anterior se debe al exceso de ablandamiento en los asfaltos de proyecto, lo que genera que la película de ligante sea menos viscosa y compromete la estabilidad de las mezclas generando el ahuellamiento.

Hay que destacar que ninguna de las mezclas presentó desgranamiento tras la prueba en la rueda cargada de Hamburgo, pues los aditivos también funcionan como agentes promotores de adherencia con el agregado y, además, las mezclas estudiadas presentan un alto contenido de cemento asfáltico de-

mandado en el diseño por factores como la naturaleza de los pétreos (densidad, absorción, etcétera).

Analizando los resultados de agrietamiento, es posible notar el efecto que confieren los aditivos rejuvenecedores a las mezclas con reciclado, ya que les otorga mayor resistencia al agrietamiento, no obstante, solo en el caso de las mezclas con 20% de RAP y dosis alta de aditivo (9%) lograron superar el valor mínimo especificado para el ensayo I-FIT. Si bien, el mismo efecto logra identificarse en los resultados del índice de agrietamiento (CT), no es posible discernir entre el impacto que genera cada aditivo en las mezclas, puesto que los valores resultantes son muy cercanos entre sí, por lo que la efectividad de los rejuvenecedores pareciera ser semejante.

La Figura 3 presenta la dispersión de puntos en un gráfico de FI vs PR para las 19 mezclas del Primer Conjunto de experimentos y se destaca que únicamente la mezcla con 20% de RAP y dosis baja de rejuvenecedor logró colocarse en el primer cuadrante

del diagrama de interacción, referido a mezclas “rígidas y flexibles” con alta resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga. Para el resto de las mezclas fabricadas, no fue posible conseguir un comportamiento aceptable ya que, por un lado, mostraron mayor susceptibilidad a la formación de roderas por exceso de aditivo (Cuadrante QII) y, por el otro lado, menor capacidad para soportar esfuerzos de tensión/tracción por la rigidez del RAP (Cuadrante QIII).

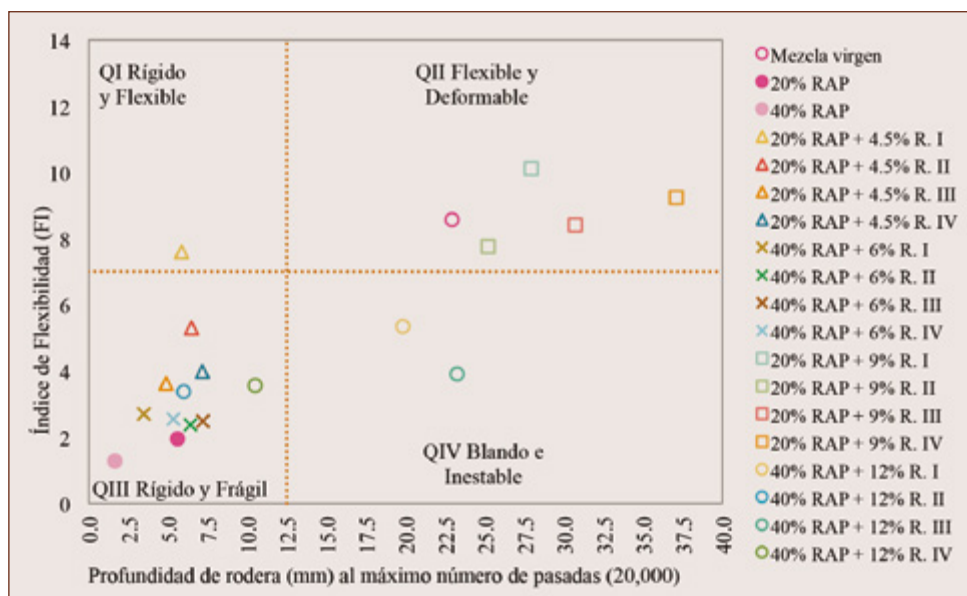


Figura 3. Diagrama de interacción del desempeño para las mezclas del Primer Conjunto.

Tabla 5. Resultados de las pruebas mecánicas del Segundo Conjunto					
Designación de la mezcla		HWTT (mm) ≤ 12.5 mm @ 20 000 pasadas	IDEAL-CT CT Index	I-FIT FI (mín. 7)	
Mezclas control	Mezcla virgen (c/C.A. modificado)	3.6	144.4	4.8	
	20% RAP	3.4	36.4	2.4	
	30% RAP	3.4	28.9	1.6	
Dosis baja de Aditivo Rejuvenecedor	5%	20% RAP + Rejuvenecedor I	4.1	69.0	5.0
		20% RAP + Rejuvenecedor II	5.3	69.7	5.3
	7%	30% RAP + Rejuvenecedor I	6.2	64.3	3.1
		30% RAP + Rejuvenecedor II	3.4	27.7	2.9
Dosis alta de Aditivo Rejuvenecedor	10%	20% RAP + Rejuvenecedor I	12.2	129.8	9.8
		20% RAP + Rejuvenecedor II	4.6	70.4	6.4
	14%	30% RAP + Rejuvenecedor I	6.9	79.8	6.6
		30% RAP + Rejuvenecedor II	7.5	59.3	7.2

Enseguida, en la Tabla 5 se presentan los resultados de desempeño para las mezclas fabricadas en el Segundo Conjunto de experimentos. Esta ocasión, se observan concretos asfálticos resistentes a la formación de roderas, cumpliendo todos ellos con el parámetro que los identifica como mezclas de alto desempeño (≤ 12.5 mm). A pesar de su excelente capacidad para no producir ahuellamiento, solo dos de las mezclas cumplen con el requisito mínimo de índice de flexibilidad (20% de RAP y dosis alta de aditivo rejuvenecedor).

El diagrama de interacción del desempeño de la Figura 4 pone de manifiesto lo antes mencionado.

Se percibe, además, que al sumar polímero en la formulación del asfalto base es posible hacer mezclas potencialmente más rígidas, ya que todas las combinaciones se posicionaron en los cuadrantes QI y QIII que describen el mejor comportamiento ante deformación permanente. Pese a que la mayoría de las mezclas se colocaron en el cuadrante QIII “rígido y frágil”, los resultados son alentadores puesto que por lo menos cuatro mezclas más lograron superar las mezclas de referencia.

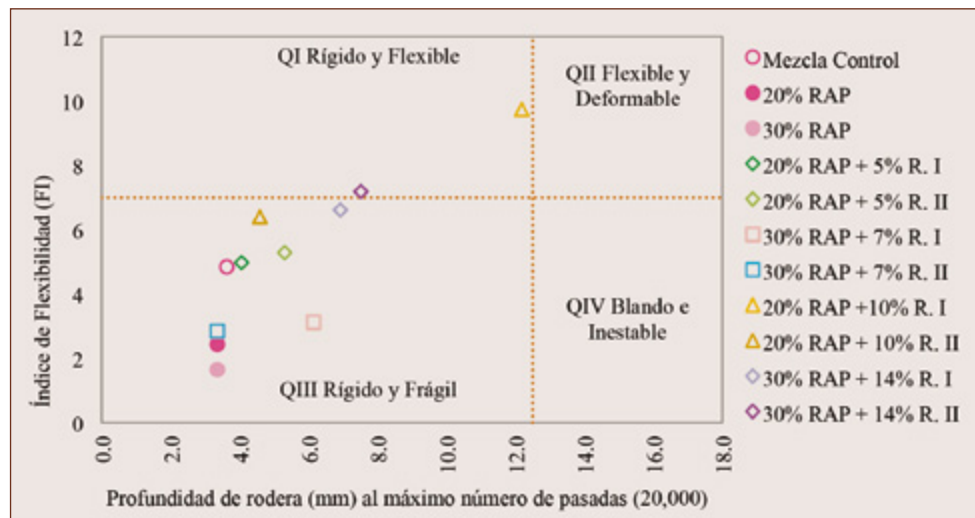


Figura 4. Diagrama de interacción del desempeño para las mezclas del Segundo Conjunto.

La última fase de este estudio estuvo encaminada a revisar la correlación que presentan las pruebas I-FIT e IDEAL-CT, con el objetivo de proponer un valor que pueda regir el buen comportamiento de una mezcla asfáltica en la prueba IDEAL-CT que actualmente no cuenta con un valor especificado, aunque se sabe que mientras más grande sea el índice calculado con este ensayo, las mezclas tendrán un mejor desempeño ante el fenómeno de agrietamiento.

Si bien el ensayo IDEAL-CT implica menor variación en el proceso de fabricación de los especímenes de prueba y su uso en trabajos de control de calidad significa menor tiempo y dificultad en la elaboración, no logra identificar entre pequeños cambios en las variables de la mezcla como pueden ser cambios sensibles en el porcentaje de RAP o en el contenido de rejuvenecedor.

Se realizó la asociación de resultados del índice de flexibilidad (FI) y el índice obtenido de la prueba IDEAL-CT mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson obteniendo el valor de 0.65 para ambos casos (Primer Conjunto y Segundo Conjunto de mezclas), lo cual demuestra una correlación moderada. Posteriormente se graficaron los mismos datos para hacer una consideración sobre el valor recomendable para el parámetro CT index; en la Figura 5 se presenta la dispersión de los resultados y con base en el modelo potencial que mejor ajusta, parece viable optar por un valor mínimo de 110 para el CT index que corresponde al requisito mínimo establecido de índice de flexibilidad (7 unidades).

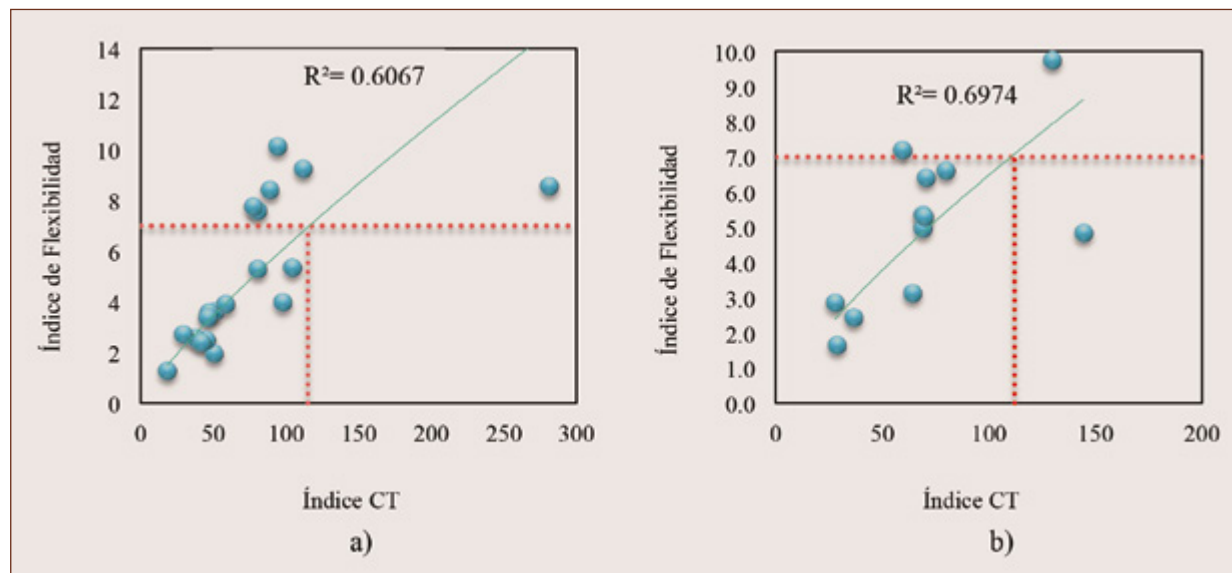


Figura 5. Correlación índice de agrietamiento FI y CTindex a) Resultados de agrietamiento Primer Conjunto de mezclas b) Resultados de agrietamiento Segundo Conjunto de mezclas.

Conclusiones

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

De acuerdo con el análisis del cemento asfáltico de proyecto (asfalto base más aditivo rejuvenecedor) se ha podido concluir que la efectividad de los productos rejuvenecedores afecta directamente en las propiedades de la mezcla reciclada, pues como se observa en los diagramas de desempeño, mezclas con características similares y diferente producto rejuvenecedor alcanzaron resultados de desempeño muy distintos.

En general, se consiguieron mezclas recicladas con mejores características resistentes al agrietamiento en las corridas del Primer Conjunto de mezclas, y superando también las características de deformación plástica en el Segundo Conjunto de mezclas.

Se consiguió ubicar tres mezclas en el primer cuadrante del diagrama de interacción del desempeño, concluyendo que es posible mejorar la capacidad resistente a rodera y fatiga en mezclas recicladas, ya sea utilizando asfalto base blando

o bien, uno más rígido (lo que implica la adición de polímero). Este punto representa mejoras respecto a mezclas sin RAP, lo cual significa que utilizar materiales reciclados no implica sacrificar la calidad final del concreto asfáltico, aunado a los beneficios ambientales que significa la utilización de materiales producto de fresado que no fueron calculados en este estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis reológicos y en mezclas asfálticas, es posible afirmar que el aditivo que mostró el mejor comportamiento fue el 'Rejuvenecedor I', para mezclas con 20% de RAP. Se comprobó que es posible diseñar mezclas resistentes a la deformación permanente y al agrietamiento, de mejor nivel que una mezcla convencional, sin embargo, es posible mejorar el resto de las formulaciones para que cumplan con los requerimientos de las especificaciones pertinentes para asegurar el correcto funcionamiento de las mezclas asfálticas, al optimizar la dosis de aditivo rejuvenecedor.

Se puede identificar, por medio de los resultados de agrietamiento, que el ensayo IDEAL-CT no permite establecer una clara diferencia entre el desempeño de las mezclas a pesar de ser una prueba más sencilla. Por el contrario, la prueba semicircular (I-FIT), además de tener un parámetro bien definido de regulación, es más sensible a los cambios entre las mezclas ensayadas.

En este estudio se propone un valor de referencia mínimo para el índice de agrietamiento CT por medio de la correlación con resultados del índice de flexibilidad, sin embargo, es importante tomar estos resultados con cautela y es deseable corroborar con más ensayos experimentales de manera que se pueda asegurar un valor que no sea conservador ni sobrevalore el desempeño de las mezclas que con esta prueba se analicen.

El diagrama de interacción del desempeño ha fortalecido la forma de diseñar mezclas asfálticas y particularmente las mezclas que incluyen material reciclado. Si bien es un procedimiento largo y un tanto complicado, resulta eficiente "calificar" la durabilidad de las mezclas a través de pruebas de desempeño, a diferencia de la manera en que se diseñan mezclas vírgenes que solo toman en cuenta parámetros volumétricos, estabilidad, flujo, daño por humedad, que son ensayos que no suelen darnos

la respuesta final que tendrá la mezcla. El paso siguiente es involucrar a los laboratorios y diseñadores a optimizar los procedimientos actuales para la dosificación de aditivo, así como el diseño balanceado en sí mismo.



¿Quieres profundizar?

- [1] Alarcón Ibarra, J. (2004). Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- [2] Ochoa Ambriz, L., Limón Covarrubias, P., Pérez Rea, M. L. (2019). Influencia de la compactación en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas en caliente con RAP. Memorias del XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, pp. 1790-1802
- [3] Faisal, H. M., Mannan, U. A., Rahman, A. S. M. A., Hasan, M. and Tarefder, R. A. (2017). Effects of RAP Sources for Performance Testing of Asphalt Concrete. International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology, pp. 119-128.
- [4] Tapsoba, N., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Baaj, H and Ech, M. (2014). Behavior of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and asphalt shingle. Road Materials and Pavement Design, 15, 2, pp. 330-347.
- [5] Colbert, B and You, Z. (2012). The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled RAP and virgin aggregate size fractions. Construction and Building Materials, 26, pp. 655-662.
- [6] Al-Qadi, I., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T & Doll, B. (2015, December). Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS. A report of the findings of ICT-R27-128. Illinois Center for Transportation Series No. 15-017. Research Report No. FHWA-ICT-15-017. Rantoul, IL: Illinois Center for Transportation.
- [7] Epps Martin, A., Arámbula-Mercado, E., García Cucalon, L., et al. (2020). Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios. Research Report 927: NCHRP. Washington, D.C.
- [8] Meroni, F., Flintsch, G.W., Diefenderfer, B. K., and Diefenderfer, S.D. (2020). Application of Balanced Mix Design Methodology to Optimize Surface Mixes with High-RAP Content. Materials, 13, 5638.
- [9] Newcomb, D. y Zhou, F. (2018). Balanced Design of Asphalt Mixtures. St. Paul, Minnesota, United States: Minnesota Department of Transportation Research Services and Library.

Plan de señalamiento vial para la auscultación de pavimentos

Magdalena Sosa
sgc@innova3.com.mx
Ana Laura Gressi
ana.gressi@innova3.com.mx
Innova Pavimentos de México, Puebla, México

Introducción

Los trabajos de auscultación de pavimentos han ido incrementando significativamente en el país durante los últimos años; si bien existen manuales y normas que establecen lineamientos de seguridad para las zonas de obras viales, están orientados a zonas de obra en donde se realizan trabajos de construcción, conservación o reparación, por lo cual no son adecuadas para trabajos de auscultación de pavimentos en los que los equipos están en constante movimiento.

A menudo ocurren accidentes durante la ejecución de los trabajos de auscultación por diversos motivos: falta de señalamiento adecuado por parte de quien ejecuta las mediciones ya sea por desconocimiento, por avanzar más rápidamente y/o por presentar una oferta económica más competitiva al cliente, cansancio o distracción de los conductores o exceso de velocidad de los usuarios de la carretera, entre otros.

Lamentablemente, son pocas las empresas que exigen a los prestadores de servicios de auscultación un plan de señalamiento bien analizado de acuerdo con las características de la zona donde se van a ejecutar los trabajos, ya sea por reducir costos o porque lo usual es que estos trabajos se realicen con un vehículo escolta y un banderero. Para los vehículos instrumentados que circulan a una velocidad cercana a la velocidad de operación, con un vehículo piloto puede resultar suficiente, sin embargo, para la ejecución de pruebas en donde el vehículo realiza paradas continuas, como puede ser el caso del deflectómetro de impacto, un vehículo piloto puede no ser suficiente para evitar accidentes.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para desarrollar un plan de señalamiento y los ajustes que se tuvieron que realizar durante la ejecución de las mediciones de auscultación en 285 km-carril en una de las autopistas más transitadas del país para poder finalizar los trabajos en el plazo estipulado y sin accidentes.

Metodología

El análisis de riesgo utilizado para el desarrollo del plan de señalamiento se basó en la norma ISO 31000:2018 “Gestión de riesgo-directrices” y en lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011 “Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo”, cuyo objeto es prevenir los riesgos laborales para

los trabajadores del área de la construcción. Para tal efecto, dicha norma establece como una obligación del patrón, realizar un análisis de riesgos potenciales.

El análisis de riesgos potenciales se basa en la jerarquización del impacto del riesgo, para lo cual se requiere analizar: qué posibilidad existe de que un

riesgo ocurra, es decir la frecuencia y la severidad del daño en caso de que el riesgo llegase a suceder.^[1] En la Tabla 1, se puede observar la manera en que se van jerarquizando los riesgos en graves, elevados, medios, bajos y mínimos, de acuerdo con su impacto.

Tabla 1. Jerarquización del impacto del riesgo^[1]

			Severidad del daño			
			I	II	III	IV
			Menor	Moderada	Crítica	Fatal
Frecuencia de ocurrencia del riesgo	E	Frecuente	Medio	Elevado	Grave	Grave
	D	Recurrente	Bajo	Medio	Elevado	Grave
	C	Ocasional	Mínimo	Bajo	Medio	Elevado
	B	Aislada	Mínimo	Mínimo	Bajo	Medio
	A	Remota	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Bajo

Por otro lado, la norma ISO 31000:2018 plantea que, para establecer un riesgo, es necesario identificarlo, analizarlo y valorarlo. El proceso de identificarlo permite encontrar, reconocer y describir aquellos riesgos que pueden impedir el logro de los objetivos establecidos; una vez que se han identificado los riesgos, deben ser analizados mediante técnicas cualitativas, cuantitativas o combinadas, cuyo objeto es entender el origen del riesgo, sus particularidades, probabilidad de ocurrencia, consecuencias, etc. Para este análisis se puede utilizar la herramienta descrita en la Tabla 1, por sí sola o en combina-

ción con otras herramientas. Finalmente, ya que se ha identificado y analizado el riesgo, es necesario valorarlo, esto implica decidir si se tomarán acciones adicionales para tratar o no el riesgo, o incluso, cambiar los objetivos.^[2]

Plan de señalamiento

En la Figura 1 se puede observar el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del plan de señalamiento, mismo que se irá describiendo más adelante con mayor detalle:



Figura 1. Proceso de desarrollo del plan de señalamiento para la auscultación de pavimentos.

Identificación de las condiciones de operación

El alcance de los trabajos a ejecutar comprendía la medición de los siguientes parámetros: índice de regularidad internacional (IRI), macrotextura, coeficiente de fricción y deflexiones. Para la ejecución de estos trabajos, se utilizan tres vehículos diferentes: para IRI y macrotextura, el equipo a utilizar está instalado en una camioneta tipo van y opera a una

velocidad de 80 km/h; para coeficiente de fricción, el equipo está colocado en un camión de 10 t que circula a una velocidad de 65 km/h (Figura 2); para deflexiones, el equipo (deflectómetro de impacto) va remolcado por una camioneta tipo pick-up (Figura 3), que va realizando paradas continuas puesto que el equipo debe estar totalmente detenido para poder realizar la evaluación, esto hace que ésta última medición sea la más peligrosa.



Figura 2. Camión de 10 t con el equipo fricción y vehículo escolta.

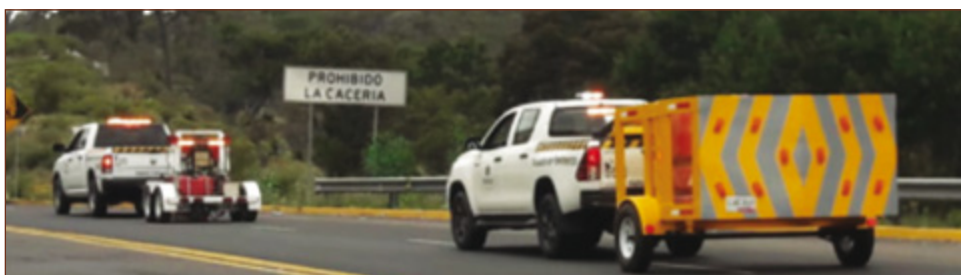


Figura 3. Vehículo tipo pick-up con deflectómetro de impacto y vehículo escolta con amortiguador de impacto.

Otro punto importante por identificar, eran las características particulares de la autopista en donde se ejecutarían las mediciones, por lo cual se realizó un recorrido previo para identificar zonas de curvas, cambios de pendientes, estructuras como puentes o túneles, así como la orografía y el ancho de calzada.

Análisis de riesgo operacional

En la Figura 4 se describe de manera general las actividades del proceso de auscultación, mismo que se estableció a través de entrevistas al personal operativo y observación durante la ejecución de trabajos similares.



Figura 4. Actividades del proceso operativo de auscultación.

Se fueron analizando una a una las actividades del proceso operativo para realizar la evaluación de los riesgos asociados a cada una de ellas; dicha evaluación incluye la identificación del riesgo, su análisis y valoración.^[2]

Para el análisis de riesgo de cada actividad, se consideró el peligro, el riesgo, la consecuencia, la frecuencia de ocurrencia del riesgo y la severidad del daño, en la Tabla 2 se muestra un ejemplo de cómo se fueron analizando los riesgos por cada una de las actividades que implicaba el proceso operativo descrito en la Figura 4.

Tabla 2. Ejemplo de análisis de riesgos por actividad

Actividad	Peligro	Riesgo	Consecuencia	F	S
Traslado a tramo carretero vehículo de IRI y macrotextura	Movilidad	Choque	Lesiones, fracturas, muerte	B	IV
	Ergonómico	Posturas inadecuadas	Transtornos musculoesqueléticos	A	II
	Mecánico	Falla del vehículo	Atraso en el traslado	B	II
	Fenómenos naturales	Tormentas	Atraso en el traslado	C	I

Para el traslado de los equipos y personal al sitio de las mediciones, el peligro es la movilidad y existe el riesgo de un choque durante el trayecto, la probabilidad aumenta con respecto al tiempo de exposición al peligro, para este caso, con base en la jerarquización de riesgos descrita en el apartado 2, este riesgo se estima como “medio” (frecuencia B y severidad IV); lo anterior debido a que se consideró una frecuencia B (aislada) puesto que el sitio de los trabajos estaba cerca del lugar de salida de los equipos, sin embargo en caso de que este choque llegase a suceder, podría tener una severidad IV (fatal).

Finalmente, una vez analizados los riesgos de cada una de las actividades para los tres vehículos a utilizar en la auscultación de pavimentos, fue posible establecer los mecanismos necesarios para tratarlos.

Plan de tratamiento del riesgo

Después de haberse determinado las acciones para el tratamiento de cada uno de los riesgos, éstas se agruparon por área: señalización vial, equipo de protección personal, capacitación al personal operativo, monitoreo de condiciones meteorológicas, revisión de condiciones de vehículos y equipos.

Para tratar los riesgos relacionados con la movilidad (choques, atropellamientos, golpes o lesiones, etc) durante la ejecución de los trabajos, se propuso desarrollar un plan de señalamiento, basado en la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SCT2-2015 “Señalamiento y dispositivos para protección en zonas de obras viales”. También se estableció el equipo de protección personal conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS-2008 “Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo”. Adicional al plan de señalamiento, se determinaron dos ejes de capacitación principales: manejo a la defensiva (incluyendo seguridad vial) y reforzar el uso del equipo de protección personal.

Dado que la autopista donde se realizaron las mediciones presenta frecuentemente períodos de lluvia y neblina, para tratar los riesgos asociados a los

fenómenos naturales, se decidió consultar dos veces al día las condiciones meteorológicas esperadas para organizar las actividades y procurar salir de la zona de trabajo previo a que las condiciones meteorológicas adversas se presentasen, ya que los equipos no están diseñados para trabajar en condiciones de lluvia pudiendo obtener datos erróneos; además de lo anterior, representa un riesgo la disminución de la visibilidad en presencia de lluvia y neblina.

Como tratamiento del riesgo de una falla mecánica en los vehículos o equipos de auscultación, se estipuló que, diariamente, previo al inicio de las mediciones, se realizaría una inspección y pruebas a los mismos.

Para asegurar el cumplimiento del tratamiento de los riesgos, se estableció un protocolo de supervisión que consistió en realizar diariamente, previo al inicio de los trabajos: pláticas de concientización de seguridad vial y de uso del equipo de protección

personal, verificación con un checklist de inspección las condiciones de los vehículos y equipos a utilizar en la medición, la realización del cerco sanitario y verificar con un checklist la cantidad y condiciones del equipo de seguridad a emplear.

Plan de señalamiento

El plan de señalamiento se enfocó en la medición de deflexiones puesto que era la actividad que requería confinamiento por las paradas continuas que realiza; para establecer la zona de trabajo que se requeriría, se consideró el avance que tiene el equipo de deflexiones en una hora. La NOM-086-SCT2-2015, establece las ecuaciones para calcular las zonas de información, transición y redireccionamiento (Figura 5), así como para calcular la velocidad restringida (máxima permitida para los vehículos que circulan por las zonas de transición, de trabajo y redireccionamiento.^[3])

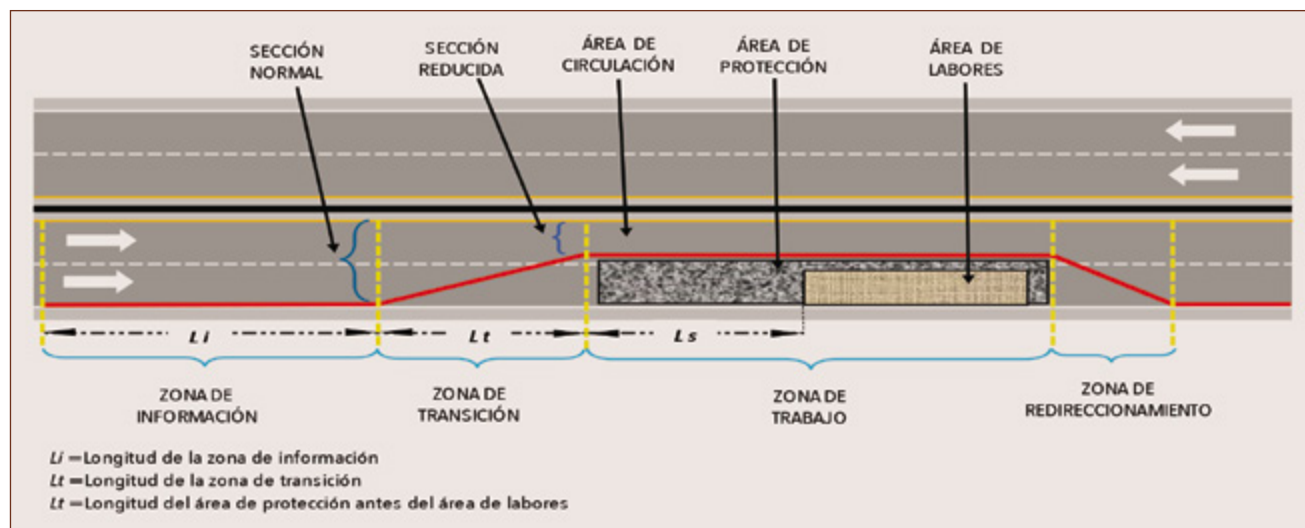


Figura 5. Zonas de obra.

Se procedió a calcular la velocidad restringida que resultó ser de 60 km/h y con base en dicha velocidad se calcularon las longitudes de cada una de las zonas de obra detalladas en la Figura 5.

La zona de información indica que se realizan trabajos sobre la vialidad y previene al usuario para que disminuya su velocidad; para tal efecto, en esta zona empiezan a aparecer las señales preventivas, restrictivas e informativas. Si bien la idea inicial era basarse en la NOM-086-SCT2-2015, enseguida

se hizo evidente que logísticamente no sería viable apearse totalmente a dicha norma por la velocidad de ejecución de los trabajos; se propuso una longitud aproximada de 2 km como zona de obra pero esto implicaba movilizar continuamente el señalamiento dado que tampoco era funcional confinar los 16 km que avanzaría el equipo en la jornada completa considerando que el tránsito de la autopista es intenso y la mayor parte de la autopista es de un carril por sentido.

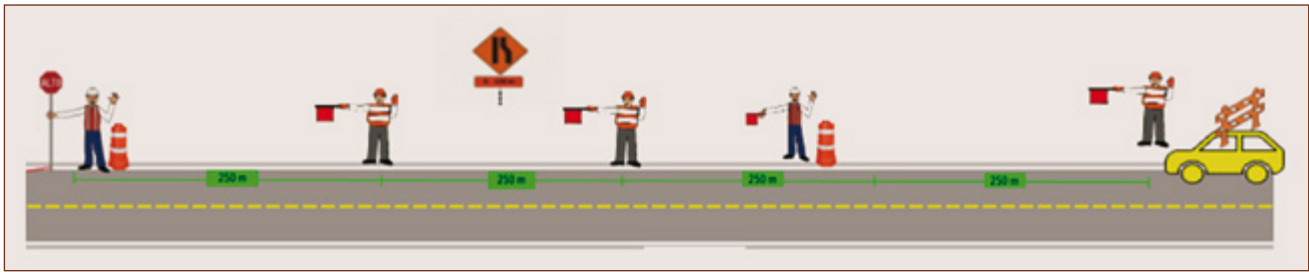


Figura 6. Señalamiento en la zona de información.

Dado lo anterior, se propuso omitir la colocación de algunas de las señales que marca la norma y sólo poner: un flechero luminoso, tres maniqués aproximadamente cada 250 metros y dos bandereros con su respectivo trafitambo, así como un señalamiento de cierre de carril, esto se representa de manera esquemática en la Figura 6.

Al finalizar la zona de información, inicia la zona de transición, cuyo objetivo es encauzar o guiar a los usuarios al carril disponible; esto debe realizarse en una determinada longitud para que sea de manera segura. Se realizó el cálculo de longitud para dicha zona, conforme a lo establecido en la NOM-

086-SCT2-2015, y el resultado fue de 150 m sin embargo, dado que la incorporación de los usuarios se realiza hacia un carril de diferente dirección, la norma estipula que se debe tomar sólo la mitad de la longitud obtenida y colocar un banderero en esta zona que regulará el paso de los usuarios en ambos sentidos, es por ello que finalmente, la zona de transición (Figura 7) tenía una longitud de 75 m. Se consideró colocar conos cada 10 m, como lo estipula la norma y omitir el señalamiento restrictivo de velocidad que solicita la norma al inicio de esta zona, para facilitar el traslado del señalamiento.

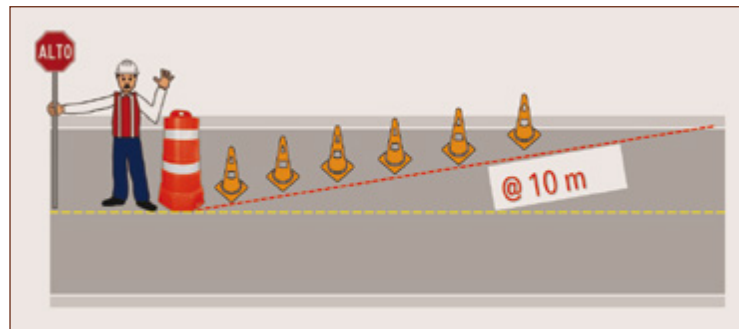


Figura 7. Zona transición.

Después de la zona de transición, inicia la zona de trabajo, misma que se conforma a su vez de la zona de protección, zona de labores y la zona de circulación. De acuerdo con la norma, la longitud de la zona de protección debía ser de 90 m. Adicionalmente, la norma contempla el uso de un am-

tiguador de impacto móvil, específicamente en la zona de protección cuando se trate de trabajos que se tengan que desplazar por la carretera, se propuso que el amortiguador de impacto se mantuviese a una distancia de seguridad de 60 m del equipo como se muestra en la Figura 8.

La AMAAC te invita a unirte a sus comités técnicos

1. Permanente
2. Mezclas densas de alto desempeño y capas de rodadura
3. Reciclados
4. Maquinaria y construcción
5. Productos asfálticos
6. Supervisión y control de calidad

7. Enseñanza y Educación
8. Seguridad vial y humana
9. Impulso profesional

Próximamente: **Comité Editorial**

capacitacion@amaac.org.mx  @AMAACmx



Figura 8. Zona de protección con amortiguador de impacto.

La zona de redireccionamiento, es la última, la cual ayuda a los vehículos a reincorporarse al carril correspondiente y se debe realizar de manera que logren alcanzar la velocidad reglamentaria. De acuerdo a la norma, esta zona debía ser de 100 m y así se propuso, además de colocar dos bandereros con su respectivo trafitambo y también se consideró colocar un maniquí.

Como medida adicional de seguridad, siempre que se utilicen equipos de auscultación, se estableció que al vehículo se le instalarán, como mínimo, los siguientes elementos: torreta o barra de luces de color ámbar, marcas reflejantes en las partes delantera y trasera, así como en los costados, además de rótulos en los que se indique que el equipo se encuentra realizando tareas de evaluación de pavimentos (Figura 9).



Figura 9. Elementos de seguridad en vehículo de auscultación.

Independientemente del tipo de equipo utilizado, el personal que ejecute los trabajos deberá portar como mínimo: botas de seguridad, overol y chaleco de alta visibilidad, casco, lentes y nuquera. Además, el personal deberá contar con radios.

Capacitación del personal operativo

La capacitación al personal se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa, dicha capacitación abarcó: manejo a la defensiva y otros temas de seguridad como las actividades de bandereo, uso y manejo de extintores, primeros auxilios y equipo de protección personal.

Se capacitó al personal operativo sobre el llenado de los checklist de inspección ya mencionados para revisar las condiciones de los vehículos y equipos. También se les dio a conocer el protocolo diario de las charlas de seguridad y el cerco sanitario.

Planeación logística

Ya con el plan de señalamiento desarrollado, se procedió a realizar una práctica en un tramo carretero poco transitado, con la finalidad de identificar los ajustes necesarios para agilizar los trabajos de medición.

Durante la actividad en campo se identificaron varias mejoras en el proceso logístico. Se detectó la necesidad de tener más radios y que el personal debe tener habilidad para colocar y recoger el señalamiento en el menor tiempo posible. Se designó a un responsable exclusivamente para la logística de la colocación del señalamiento.



Figura 10. Práctica de señalamiento en campo.

Ejecución de trabajos operativos

Durante la ejecución de los trabajos en el tramo de estudio, se identificó que realizar un confinamiento tan completo como se había considerado en el plan de señalamiento inicial era complicado debido a que, aunque los impactos de medición de deflexiones eran cada 40 metros, el equipo avanzaba rápidamente respecto al tiempo en que el personal colocaba el señalamiento; como resultado se optó por una reducción importante de la cantidad de señalamiento y utilizar únicamente conos, bandereros y el amortiguador de impacto, eliminando el uso de los maniquís, trafitambos y del flechero luminoso.

Con respecto a los bandereros, fue necesario emplear seis, mismos que se situaron atrás del parapeto metálico para evitar el riesgo de atropellamiento. Tres bandereros se colocaron detrás del amortiguador de impacto con conos y los otros tres estaban del

otro lado, también con conos para que los usuarios de la vía identificaran que se acercaban a una zona de trabajos y no rebasaran.

Con relación a los registros de campo, se encontraron especialmente útiles los checklist de inspección de vehículos y equipos, como un sistema de prevención de fallas que impliquen un atraso en los trabajos.

Conclusiones

Se concluye que, para las mediciones de auscultación, si bien no resulta funcional realizar un confinamiento completo como lo establece la NOM-086-SCT2-2015, tampoco es suficiente incorporar el amortiguador de impacto por sí solo, especialmente en autopistas con alto flujo vehicular y velocidades de operación altas. En este caso, fue necesario emplear a seis bandereros para que las mediciones se realizaran sin accidentes. Es de suma importancia que el personal que se encuentra realizando los trabajos esté capacitado y muy bien coordinado al momento de mover el señalamiento.

Cabe destacar que la cantidad de personal y señalamiento necesario, pueden variar conforme a la geometría y características particulares de la viabilidad, por lo cual es recomendable que siempre se analicen los riesgos que conllevará cada medición en particular para evitar accidentes.

Hace falta desarrollar lineamientos de señalamiento adecuados a las necesidades específicas de las mediciones de auscultación de pavimentos para reducir los accidentes y que tanto los prestadores de servicios los apliquen, como los contratantes los paguen.



¿Quieres profundizar?

- [1] Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011 "Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo". Ciudad de México. 2011.
- [2] Organización Internacional de Normalización. ISO 31000:2018 "Gestión de riesgo-directrices". 2018.
- [3] Diario Oficial de la Federación. NOM-086-SCT2-2015 "Señalamiento y dispositivos para protección en zonas de obras viales". Ciudad de México. 2016.

ASFIER[®]

Emulsificantes asfálticos.

KAOAMIN[®] / GRIPPER[®]

Aditivos promotores de adherencia.
Aditivos para mezcla tibia.
Modificadores reológicos.

DANOX RAP-300[®]

Aditivo para reciclado de pavimentos asfálticos.

TRASUT-RA[®]

Innovador tratamiento superficial de rápida
apertura al tráfico con espesor desde 1 cm.



Evaluación de las propiedades mecánicas a deformación permanente de mezclas asfálticas para carreteras de alto tránsito

Horacio Delgado Alamilla

Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México

hdelgado@imt.mx

Yelitza Ayala del Toro

Asociación Mexicana del Asfalto, AC, Querétaro, México

yayala@amaac.org.mx

Introducción

El incremento continuo en el nivel de tránsito ocasiona la aparición de fallas prematuras en el pavimento. Estas son debidas a los niveles de esfuerzos internos que se presentan en la carpeta asfáltica. Estos esfuerzos se transforman en fallas, como son la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga. Por esto, es importante realizar una adecuada evaluación de la mezcla asfáltica tanto en el diseño como en el control de calidad.

En lo referente a la evaluación de la deformación permanente, en México se utiliza un ensayo empírico tanto para el diseño como para el control de calidad. Sin embargo, en muchas ocasiones, en las evaluaciones realizadas se han obtenidos resultados incongruentes y se ha observado que no logra identificar pequeñas variaciones en los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica (granulometría, % vacíos de aire, tipo de asfalto). Por lo cual, el presente estudio se enfoca en este comportamiento realizando comparaciones de resultados de ensayos de laboratorio bajo diferentes condiciones de ensayo.

El estudio considera tres tipos de ensayos para caracterizar el comportamiento a la deformación permanente. El primero es el ensayo recuperación elástica por esfuerzo múltiple (MSCR) en el reómetro de corte dinámico (DSR) bajo la norma ASTM D7405; el cual es el ensayo que se utiliza para caracterizar las propiedades a deformación permanente del material asfáltico bajo el parámetro J_{nr} y su recuperación elástica. El segundo ensayo es la Rueda Cargada de Hamburgo bajo la norma AASHTO T324, el cual es el ensayo empírico más utilizado en México para la evaluación de la deformación permanente. El último ensayo es la compresión axial cíclica (CAC), el cual es un ensayo mecánico aplicando un esfuerzo de impulsión controlando diferentes parámetros como son la temperatura, frecuencia, esfuerzo axial y radial.

Comparación de ensayos MSCR vs Rueda cargada de Hamburgo

La primera comparación realizada tiene como objetivo establecer la pertinencia del ensayo MSCR; es decir, verificar si un asfalto cumple este parámetro, se asegura el buen desempeño a deformación permanente de la mezcla asfáltica. Para esto se seleccionó un asfalto PG 76H-16 y se elaboró una mezcla asfáltica de granu-

lometría densa con un TN de 19.0 mm y se realizó una evaluación de su susceptibilidad a la deformación permanente mediante el ensayo de RCH. Los resultados obtenidos tanto del ensayo de MSCR como de la RCH se presentan en la Figura 1. El ensayo de RCH cumple con el requisito profundidad de rodera de 10 mm máximo a las 10000 pasadas, por lo cual se podría decir que con un asfalto PG76H se puede cumplir con el parámetro de deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Sin embargo, en este punto no se puede decidir si el cumplimiento es debido al asfalto utilizado o por la estructura granulométrica de la mezcla asfáltica. Con el objetivo de verificar si el resultado depende del tipo de asfalto, se realizó un nuevo ensayo, pero ahora utilizando un asfalto PG76, que no cumple con el parámetro de recuperación elástica para una carga de 3.2 kN y por lo cual no puede clasificarse de acuerdo con la normativa de la SCT. Se elaboró la mezcla asfáltica con el mismo material pétreo y estructura granulométrica y se evaluó en el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, los resultados se presentan en la Figura 2. En esta Figura se observa que la mezcla asfáltica cumple con el criterio establecido en el ensayo de RCH a pesar de que asfalto no cumplió con la evaluación MSCR. Esto es un indicador que la estructura granulométrica tiene una mayor influencia en la deformación permanente de la mezcla que el tipo de asfalto modificado utilizado. No obstante, esto debe ser verificado mediante una experimentación en laboratorio.

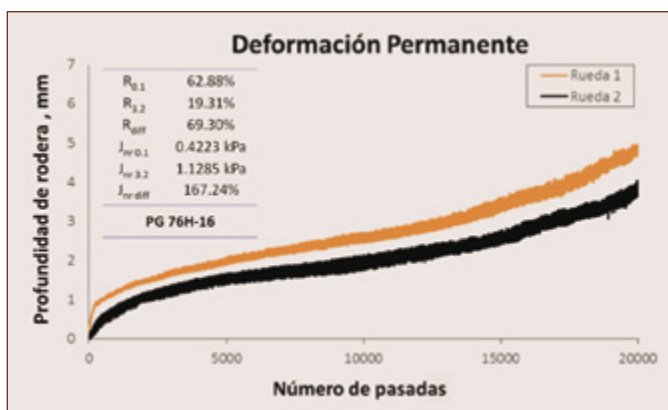


Figura 1. Ensayo de Rueda cargada de Hamburgo, mezcla asfáltica con asfalto PG76H-22.

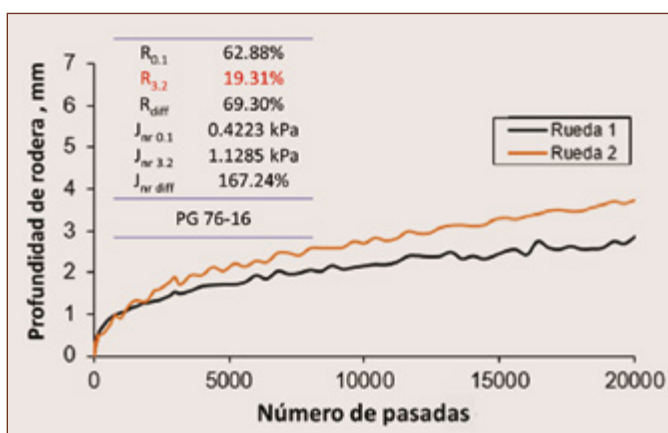


Figura 2. Ensayo de Rueda cargada de Hamburgo, mezcla asfáltica con asfalto PG76-22.

Tabla 1. Granulometrías propuestas				
Malla	Granulometría			
	Designación	abertura	% Pasa	
			G1	G2
1"	25.0		100	100
¾"	19.0		99.7	99.7
½"	12.5		83.0	82.0
⅜"	9.6		65.4	62.1
¼"	6.3		50.8	44.6
No. 4	4.75		45.7	38.2
No. 8	2.36		39.6	31.4
No. 16	1.18		28.9	22.8
No. 30	0.60		18.4	14.6
No. 50	0.30		10.5	8.4
No. 100	0.15		5.9	4.8
No. 200	0.075		3.4	2.8

Para llevar a cabo una segunda etapa de experimentación, se realizó un experimento utilizando el mismo asfalto (PG76H-22), y se diseñaron dos granulometrías con el método Bailey. Las granulometrías propuestas y la evaluación mediante el método Bailey se presentan en las Tablas 1 y 2. La granulometría 1 (G1) fue ajustada de tal forma que incumpliera con la mayoría de los parámetros del método y la Granulometría 2 (G2) que cumpliera la mayoría de los parámetros.

En base a estas granulometrías se realizó el diseño volumétrico de las mezclas asfálticas. Para la granulometría 1 se obtuvo un contenido de asfalto de diseño de 4.9% y para la granulometría 2 de un 4.5%, ambos contenidos calculados con respecto a la masa de la mezcla asfáltica.

Tabla 2. Evaluación de las granulometrías por el método Bailey

Parámetro	Método Bailey		
	Especificación	G1	G2
PVFGS ¹	95 – 105	89.4%	105.0%
Índice FG ²	0.6 – 0.75	0.569	0.637
FF _a ³	0.35 – 0.50	0.632	0.595
FF _f ⁴	0.35 – 0.50	0.365	0.369

¹ Peso volumétrico de la fracción gruesa suelta
² Índice de la fracción gruesa
³ Fracción fina de las arenas
⁴ Fracción fina del filler

Los resultados de la evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente se presentan en la Figura 2 en donde se observa la influencia en la granulometría en este parámetro de diseño, ya que con el mismo asfalto modificado se tiene desempeños diferentes, siendo que la granulometría mal diseñada (G1) no cumple con el criterio de rodera.

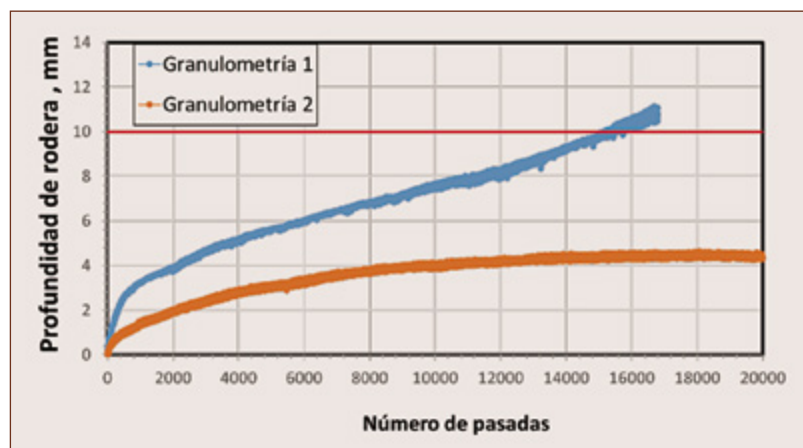


Figura 3. Evaluación de la influencia de la granulometría en el ensayo de RCH.

En base con las evaluaciones realizadas en asfaltos modificados con el ensayo MSCR, se sabe que este ensayo permite identificar la respuesta elástica y es un buen indicador para diferenciarlos. Sin embargo, con esta simple experimentación se puede establecer que el desempeño a deformación permanente depende mayormente de la estructura granular y el ensayo MSCR no puede asegurar por sí solo el buen desempeño de la mezcla asfáltica ante este tipo de degradación.

Sensibilidad del ensayo de Rueda cargada de Hamburgo (RCH)

El punto anterior dejó claro que, para confirmar el comportamiento a deformación permanente se requiere evaluar la mezcla asfáltica. En México esta evaluación se realiza mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo. Una de las dudas principales es si el ensayo puede identificar variaciones en los parámetros de diseño o constructivos como son el porcentaje de vacíos de aire (Va), contenido de asfalto (Pb), temperatura de compactación y granulometría. Por lo cual, se realizó una evaluación de la

influencia de dos parámetros, el contenido de asfalto (Pb) y el porcentaje de vacíos (Va).

La experimentación consistió en realizar el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica y durante la evaluación solamente se varió un parámetro a analizar y los demás se mantuvieron constantes. La primera evaluación realizada fue la influencia del contenido de asfalto. Para esto, se definió el contenido de asfalto de diseño (5.4% con respecto a la mezcla asfáltica), y se varió el contenido en los siguientes rangos $\pm 0.3\%$, $\pm 0.5\%$, $+1.0\%$ y $+2.0\%$. Los resultados de la evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas se presentan en la Figura 4. En esta se observa que, a pesar de las variaciones realizadas en el contenido de asfalto, la mezcla sigue cumpliendo con el criterio de este ensayo, lo cual podría ser un indicador de que el contenido de asfalto no influye en la deformación permanente. Sin embargo, este es uno de los parámetros de más influencia en este tipo de degradación, lo que lleva a deducir que el ensayo no puede detectar las variaciones de este parámetro cuando la estructura granulométrica fue correctamente diseñada.

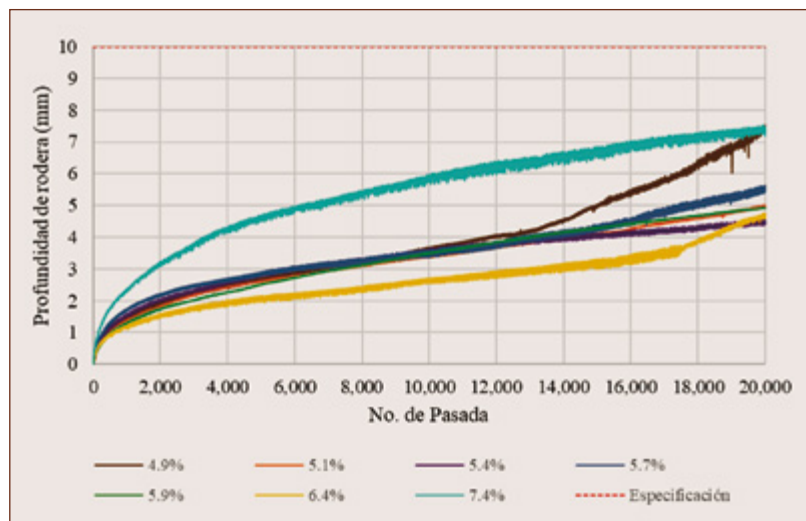


Figura 4. Influencia del contenido de asfalto (Pb) en la susceptibilidad a la deformación permanente evaluado en la Rueda cargada de Hamburgo

Para la evaluación de la influencia del porcentaje de vacíos, se compactaron especímenes a cuatro diferentes porcentajes de vacíos de aire, los porcentajes utilizados fueron 4%, 7%, 9.5% y 11.5%. Estos especímenes fueron evaluados en la RCH, y los

resultados se presentan en la Figura 5. Se puede observar que el ensayo es más sensible a este parámetro, ya que se logra identificar un incremento en la profundidad de rodera con el aumento del porcentaje de vacíos de aire. Siendo que para un

porcentaje de vacíos de 11.7%, la mezcla no cumple con el criterio del ensayo. Sin embargo, la mezcla con 9.5% de vacíos cumple la especificación, lo cual no parece adecuado ya que una mezcla asfáltica con un contenido de vacíos tan alto es muy susceptible a presentar roderas.

Con base en estos resultados y lo observado en el punto anterior, se puede concluir que el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo sí puede identificar cuando la mezcla asfáltica es susceptible a presentar deformación permanente de manera prematura; lo cual, hace que esta evaluación sea indispensable para el diseño y control de calidad de una mezcla asfáltica. No obstante, hay ciertos casos, mayormente en el diseño de pavimentos de alto tránsito ($>30 \times 10^6$ ESALs), en donde la mezcla asfáltica debe cumplir con prestaciones de desempeño altas; la selección de esta involucra el comparar diferentes materiales (asfaltos modificados) o estructuras granulométricas (Densas, finas, SMA) entre otras consideraciones. Siendo el objetivo seleccionar la mejor alternativa, será en esos casos en donde el ensayo de RCH no podrá discernir entre las diferentes opciones, obteniéndose resultados similares o asociados a la dispersión del ensayo.

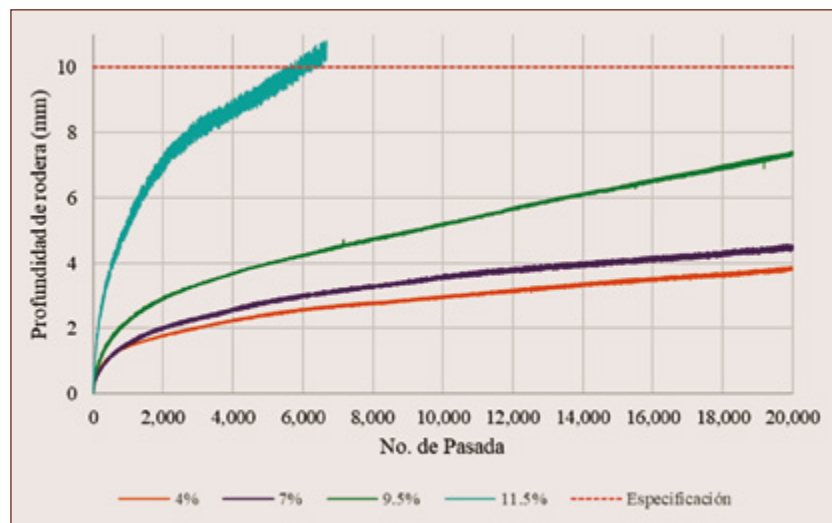


Figura 5. Influencia del porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la susceptibilidad a la deformación permanente evaluado en la Rueda cargada de Hamburgo.

Ensayo de compresión axial cíclica (CAC)

Dado que el ensayo de RCH no puede identificar pequeñas variaciones en los parámetros de diseño, ni discernir entre diferentes mezclas asfálticas de alto desempeño, se requiere utilizar otro ensayo para este tipo de condiciones.

El problema principal de esta situación es definir cuál es el ensayo adecuado para realizar esta evaluación, dado que existen diferentes ensayos para evaluar la deformación permanente de la mezcla asfáltica. Como punto de partida, se definió que el ensayo no debería ser un ensayo empírico, como es el caso del ensayo de RCH y se debería optar por un ensayo que pudiera evaluar propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. El ensayo seleccionado fue el de

compresión axial cíclica (CAC), esto por dos razones fundamentales, la primera es que los ensayos mecánicos requieren de prensas e instrumentaciones costosas, lo cual requeriría de una inversión importante y que sería complicada de realizar para los laboratorios. Este ensayo utiliza la misma prensa y prácticamente la misma instrumentación del ensayo de módulo dinámico, lo cual hace factible que los laboratorios que realicen este ensayo, lo puedan instrumentar con un costo no tan significativo. La segunda razón es que la sollicitación aplicada en el ensayo es similar a la que se realiza en el ensayo de MSCR antes descrito, la cual es una sollicitación de impulsión (carga-descarga) y esto hace que se puedan comparar los parámetros mecánicos medidos entre ambos ensayos.

Procedimiento de ensayo

El ensayo de compresión axial cíclica consiste en la aplicación de una carga haversine axial de compresión. El ensayo se basa en los parámetros indicados en la norma de referencia AASHTO TP79-15, donde inicialmente se deben fabricar especímenes de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura, para posteriormente extraer el núcleo y cortarlo con el objetivo de obtener especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura. El ensayo aplica una carga axial de impulsión utilizando una onda haversine de compresión. Se aplica la carga durante 0.1 s y un periodo de relajación del material de 0.9 s, lo que completa un ciclo de 1.0 s y se traduce en una frecuencia de 10 Hz (Figura 6), este ensayo también puede realizarse a una frecuencia de 5Hz y 1Hz.

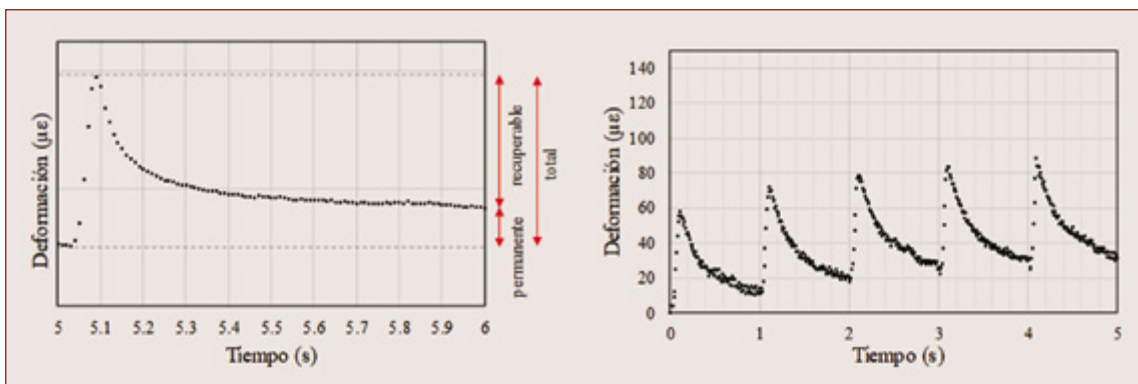


Figura 6. Deformación por ciclo, $fr = 10$ Hz.

Sensibilidad del ensayo de compresión axial cíclica (CAC)

Como primer punto de análisis se evaluó la capacidad del ensayo de CAC para identificar variaciones de los parámetros de diseño. Como en el punto tres, se evaluó la influencia del porcentaje de asfalto y el porcentaje de vacíos. La Figura 7 presenta la evaluación de dos contenidos de asfalto en el ensayo de CAC, los dos puntos evaluados fueron seleccionados de acuerdo con la experimentación presentada en la Figura 4, siendo que estos dos porcentajes de asfalto cumplían con el criterio del ensayo de RCH y no había diferencias significativas en la profundidad de rodera al final del ensayo (diferencia aproximada de 2 mm).

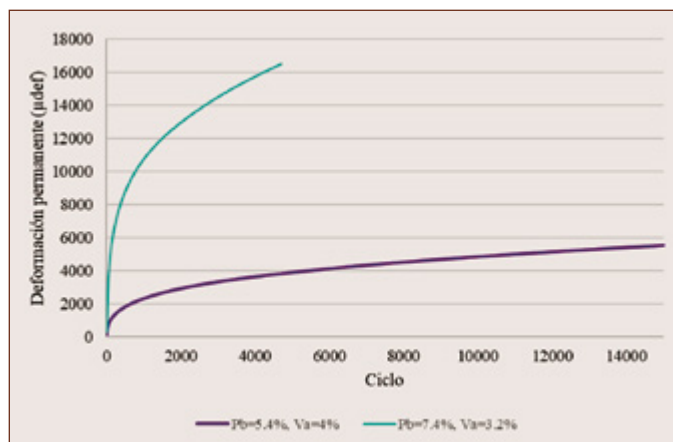


Figura 7. Influencia del contenido de asfalto en la deformación permanente evaluado en CAC.

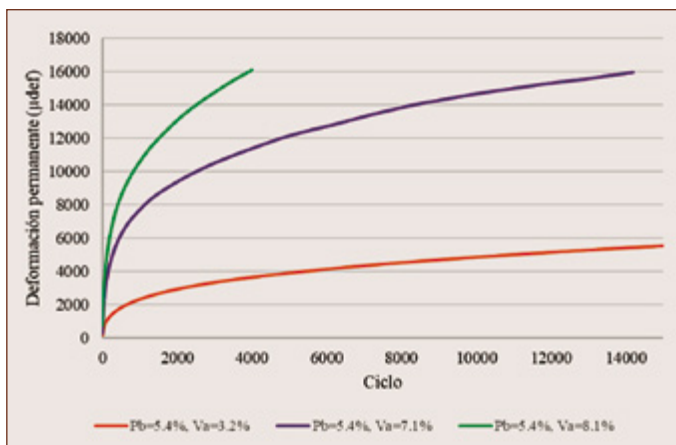


Figura 8. Influencia del porcentaje de vacíos de aire en la deformación permanente en CAC.

De esta Figura podemos observar que existe una diferencia significativa en la deformación permanente por la variación del contenido de asfalto cuando la mezcla se evalúa en el ensayo de CAC. Lo cual indica que este ensayo puede detectar de mejor forma las variaciones de los parámetros de diseño. Para confirmar esto, se realizó la siguiente experimentación variando el porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica. Esta evaluación consideró tres diferentes contenidos de vacíos de aire (3.2%, 7.2% y 8.1%), los cuales son similares a los valores que cumplieron con el criterio del ensayo de RCH en la Figura 5. Los resultados se observan en la Figura 8, en la cual podemos observar el ensayo de CAC también puede identificar la variación de este parámetro de diseño de manera más precisa. Con estas dos experimentaciones se puede

concluir que el ensayo de compresión axial cíclica puede identificar la influencia de las variaciones en la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

Influencia del tipo de ligante asfáltico

Uno de los problemas principales del ensayo de RCH es que no logra diferenciar entre tipos de materiales asfálticos o estructuras granulares. Por lo cual, se realizó una última experiencia de laboratorio en donde se elaboraron mezclas asfálticas con dos diferentes tamaños nominales (TN12.5 mm y TN 19.0 mm) y utilizando tres diferentes ligantes asfálticos (A1-PG64H-16, A2-PG76H-22 y A3-PG76H-16). Las estructuras granulométricas utilizadas se presentan en la Figura 9.

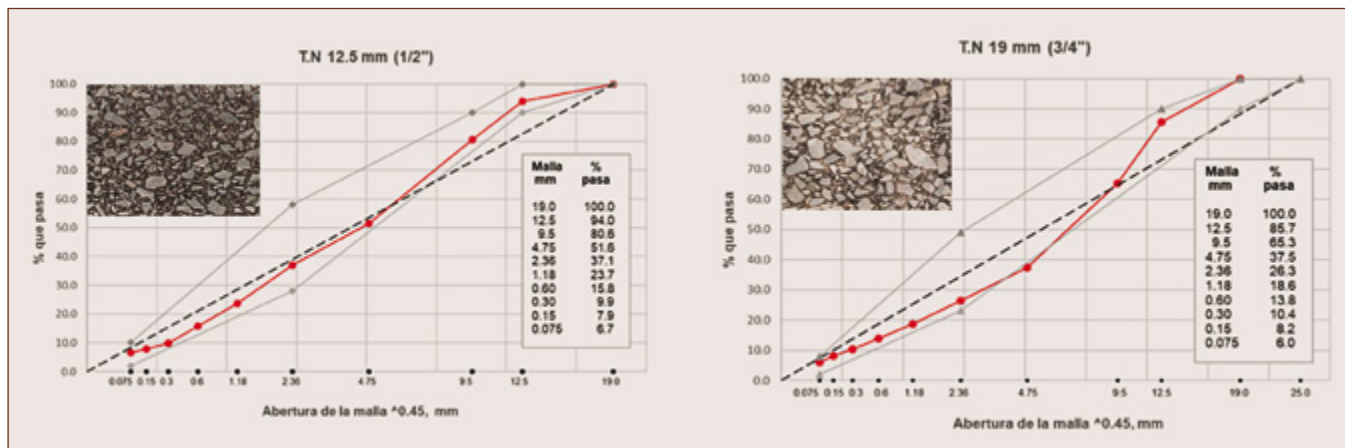


Figura 9. Granulometrías utilizadas para evaluar la influencia del ligante asfáltico.

La Figura 10 presenta los resultados del ensayo de CAC realizado para una temperatura de 30 °C, esfuerzo axial de 600 kPa y una frecuencia de 1Hz. De esta evaluación se puede observar que sin importar la granulometría utilizada, el ensayo de CAC puede establecer la influencia del tipo ligante asfáltico en la respuesta a la deformación permanente de la mezcla asfáltica.

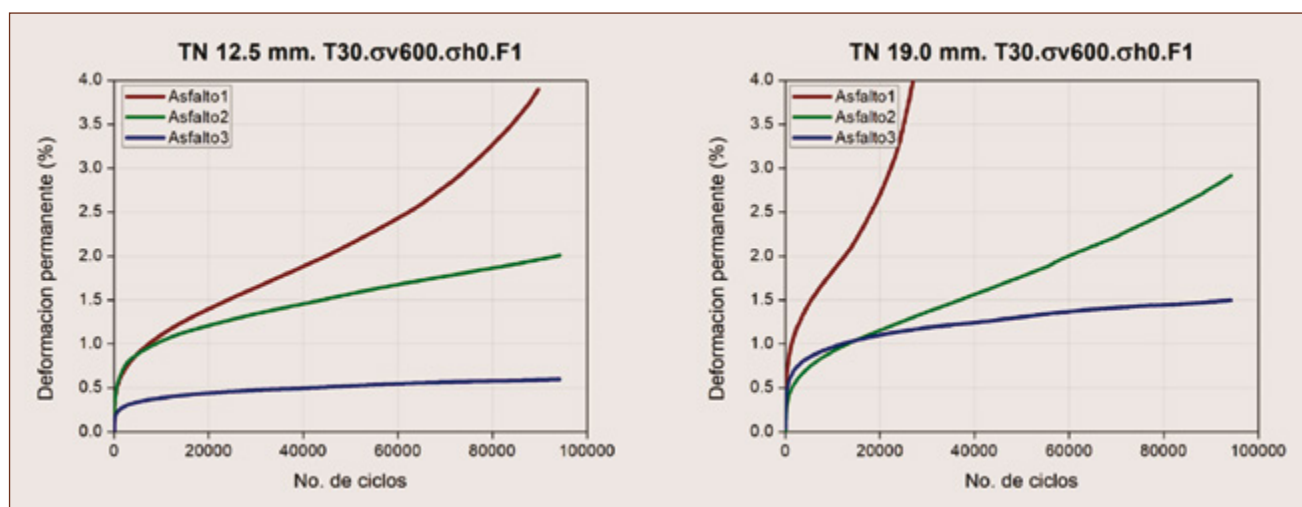


Figura 10. Evaluación de la influencia del ligante asfáltico en el ensayo CAC.

Propuesta para el diseño de mezclas asfálticas

Como se mencionó anteriormente, se recomienda utilizar el ensayo de CAC para el diseño de mezclas asfálticas para carreteras de alto tránsito, lo cual es considerado en el Protocolo AMAAC más de 30×10^6 ESAL's. Esto no significa que el ensayo de RCH sea eliminado para este rango de tránsito, ya que, como se mencionó anteriormente, ha demostrado ser un buen indicador de fallas prematuras en la mezcla asfáltica y es esencial para el control de calidad. La propuesta de ensayos a realizar para el diseño de mezclas asfálticas de alto tránsito se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de deformación permanente para mezclas con tránsitos $>30 \times 10^6$ ESAL's

Características	Especificación
Susceptibilidad a la formación de roderas y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo a 50°C y 20 000 pasadas, mm, máximo	10
Deformación permanente mediante el Ensayo de Compresión Axial Cíclica, 40°C, $s_v = 400\text{kPa}$, $s_h = 0\text{kPa}$, $f = 5\text{Hz}$ ($\tau_c = 0,2\text{s}$, $\tau_r = 0,8\text{s}$), ciclos de carga 10 000, deformación axial acumulada, %, máxima	1,5


Conclusiones

El diseño de mezclas asfálticas en caliente ha evolucionado y esto ha llevado a diversas actualizaciones en los procedimientos de diseño y los ensayos para la evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica.

En el documento se presentaron diferentes experiencias de laboratorio enfocadas en el fenómeno de deformación permanente, cual puede ser evaluado tanto en el material asfáltico como en la mezcla asfáltica.

En lo que se refiere al ensayo MSCR, sabemos que permite identificar la respuesta elástica de los materiales asfálticos modificados y es un buen indicador para diferenciarlos. Sin embargo, se demostró que el desempeño a deformación permanente depende mayormente de la estructura granular y el ensayo MSCR no puede asegurar por sí solo el buen desempeño de la mezcla asfáltica ante este tipo de degradación.

La evaluación de la deformación permanente en México se realiza mediante el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo, el cual ha demostrado tener la capacidad de evidenciar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a sufrir deformación permanente prematura, lo cual lo hace indispensable en los procesos de diseño y control de calidad.

Para diseño de mezclas asfálticas de alto tránsito ($>30 \times 10^6$ ESAL's), se requiere adicionar un ensayo que pueda identificar pequeñas variaciones en los parámetros, así como comparar diferentes tipos de materiales pétreos y asfálticos, así como estructuras granulométricas. Para esto se propuso el ensayo de compresión axial cíclica, el cual es un ensayo mecánico que permite identificar de mejor forma estas variaciones. Agregando una propuesta de evaluación para diseños con altos niveles de tránsito. 

¿Quieres profundizar?

- ^[1] AMAAC PA-MA-022 (2016). Control y aseguramiento de calidad para mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño. Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- ^[2] AMAAC PA-MA-013 (2013). Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño. Ciudad de México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. ISBN: 978-607-8134-19-9.
- ^[3] Biligiri, K. P., Kaloush, K. E., Michael, S. M., & Witzczak, M. W. (2007). Rational modeling of tertiary flow of asphalt mixtures. TRB No. 2001 (págs. 63-72). Washington, D.C.: TRB.
- ^[4] Rahman, F., & Mustaque, H. (2014). Review and Analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data: Report No. KS 14-1, Final Report. Kansas State University Transportation Center.
- ^[5] Romero, P., Vanfrank, K. & Nielson, J. (2008). Analysis of the Hamburg wheel-tracking device to predict behavior of asphalt mixtures at different test temperatures. Report No. UT-08.29. Utah Department of Transportation.
- ^[6] Delgado, H., Ayala, Y., Zambrano M. (2021). Análisis de variación de parámetros de diseño en el comportamiento a deformación permanente de una mezcla asfáltica. Publicación técnica núm. 632. San fanfila, Qro



EN DIRECTO
con AMAAC

Transmisión en vivo por



¡Síguenos para más información!



¡Únete a este foro!

Promociona a tu empresa
y comparte tus experiencias
y conocimiento.



VISE

Cambiando el
FUTURO



www.vise.com.mx



exitocliente@vise.com.mx | (477) 215 9000

GMC

- GRUPO MULTISERVICIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN -

• ASFALTOS •
• COMBUSTIBLES •
• MAQUINARIA •

CONTÁCTANOS

