



EVALUACIÓN DE CAPAS DE RODADURA EN FRÍO EN CAMINOS Y CARRETERAS DE ALTAS ESPECIFICACIONES EN MÉXICO CON DISTINTAS CONDICIONES DE TRÁNSITO Y CLIMA

Rosita Martínez¹, Eymard Ávila², Jonathan Hernández³, Carlos Coria⁴

¹ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, rosita.martinez@ergon.com

² Ergon Asfaltos México, Puebla, México, eymard.avila@ergon.com

³ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, jonathanarturo.hernandez@ergon.com

⁴ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, carlos.coria@ergon.com

Resumen

Las capas de rodadura (CR) están elaboradas con mezcla asfáltica de características específicas de acuerdo con la funcionalidad que tendrán en la estructura del pavimento. Las CR más usadas en México corresponden a mezclas elaboradas en caliente con cemento asfáltico modificado con polímero y mezclas asfálticas elaboradas en frío con emulsión asfáltica modificadas con polímero.

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento en campo de distintas CR en frío con base en los indicadores de desempeño de macrotextura (MTX) y coeficiente de fricción (CF) con diferentes condiciones de proyecto como el tránsito y clima en tramos de la red carretera de nuestro país. Las CR en frío construidas en estos pavimentos incluyeron el sistema de Macrocalafateo Inducido y Capa Friccionante (MCI-F), CASAA en frío (CASAA-F) y Riegos de Sello (RS).

La medición de los indicadores de desempeño fue realizada mediante un perfilómetro láser para la obtención de los valores de MTX y con un equipo de fricción de rueda oblicua para el CF.

Los resultados muestran que el efecto estacional incide notoriamente en la MTX y el CF. En las mediciones de MTX y CF los valores fueron menores antes de la temporada de lluvia en comparación que las efectuadas posteriormente. El efecto del tránsito hasta el momento no ha tenido un efecto marcado en la MTX y CF. Ese efecto se notará una vez que las CR hayan llegado al final de su vida útil. A mayor tamaño nominal del agregado pétreo empleado en las CR se obtuvieron valores más altos de MTX y CF.

Se seguirán monitoreando las CR para seguir estudiando el comportamiento funcional ante la acción de cargas vehiculares y fenómenos medioambientales.

Palabras Clave: capas de rodadura, macrotextura, coeficiente de fricción, indicadores de desempeño.

1 Introducción

Las capas de rodadura (CR) son carpetas delgadas de mezcla asfáltica que son construidas sobre estructuras de pavimentos. El objetivo de la colocación de una CR es proporcionar o restaurar características funcionales en la superficie del pavimento. Este tipo de capas no son empleadas en pavimentos con deficiencias estructurales.

Los principales daños en los pavimentos que han sido exitosamente mitigados con las CR son: superficies envejecidas, agrietamiento en bloque, agrietamiento longitudinal, roderas de baja magnitud, desprendimiento, oxidación y pérdida de fricción [1]. Diversos estudios han demostrado beneficios de extensión de la vida útil del pavimento [2]. Esto se logró, principalmente, al mejorar la circulación segura y cómoda al usuario [3], reducir ahuellamientos en la superficie [4], minimizar la



infiltración de agua [5], retardar el envejecimiento del pavimento existente [6] y reducir la cantidad de ruido durante el uso del camino [7].

En México las CR son comúnmente empleadas como sistemas de conservación en pavimentos con una importante carga acumulada de tránsito vehicular y, de manera menos frecuente, en pavimentos recién construidos. Las CR más usadas corresponden a mezclas elaboradas en caliente: CASAA (Carpeta Asfáltica Superficial Altamente Adherida), SMA (Stone Mastic Asphalt) y las CR elaboradas en frío: Microaglomerados (MA) y Riegos de Sello (RS). Algunas alternativas constructivas de reciente aplicación en el país incluyen los sistemas de macrocalafateo inducido y capa friccionante (MCI-F) y CASAA en frío (CASAA-F).

Las CR de aplicación en frío tienen la ventaja de construirse a temperatura ambiente ya que son elaboradas con emulsión asfáltica modificada con polímero, reduciendo así, el consumo de combustible al no requerir el calentamiento de los materiales y a minimizar el impacto ambiental.

Cada una de las CR tienen particularidades específicas y son seleccionadas con base en los daños de la superficie existente. Los indicadores de desempeño son parámetros de medición del nivel de servicio que se ofrece al usuario de la carretera. El nivel de servicio es evaluado mediante factores como las características de fricción y la textura superficial del pavimento, así también por las condiciones geométricas del perfil del pavimento (Profundidad de rodera, índice de perfil o de regularidad), entre otros. Debido a que las CR pueden mejorar parcial o totalmente uno o más de los indicadores de desempeño, es indispensable evaluar los alcances de cada una de estas, así contar con la previa valoración del camino por intervenir. Una breve descripción de las CR e indicadores de desempeño es mostrada en el apartado siguiente.

1.1 Capas de rodadura e indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño que forman parte de la normativa de construcción a cargo de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), así como de los contratos de conservación de redes carreteras concesionadas, incluyen elementos como la Profundidad de Rodera (PR), IRI (índice de Regularidad Internacional), coeficiente de fricción (CF), macrotextura Superficial (MTX), Agrietamiento (GR), entre otros. En la Tabla 1 se muestran las principales CR usadas en México y los principales indicadores de desempeño que se pretende mejorar con la construcción de cada CR y en la Tabla 2 se mencionan los equipos y/o procedimientos comúnmente usados para la medición de estos indicadores.

Tabla 1. Principales Capas de Rodadura.

Método de elaboración	CR	Tipo de granulometría	Indicadores de desempeño por mejorar
En caliente	CASAA	Discontinua	MTX, CF
	SMA	Discontinua	CF, GR, IRI*
	OGFC	Abierta	MTX, CF
En frío	MA	Densa	MTX, CF, PR
	CASAA en frío	Discontinua	MTX, CF
	RS	Abierta	MTX, CF

*Dependiendo del espesor

Tabla 2. Indicadores de desempeño y equipos de medición.

Indicadores de desempeño	Equipo de medición
MTX	Perfilógrafo láser, círculo de arena



CF	Equipo de fricción de rueda oblicua o similar
PR	Perfilógrafo láser
IRI	Perfilógrafo láser
GR	Perfilógrafo láser, inspección visual

2 Objetivo

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el desempeño de las CR en frío construidas en cuatro tramos carreteros a través del tiempo mediante indicadores de desempeño: coeficiente de fricción (CF) y macrotextura (MTX). Para este estudio se analiza el efecto estacional (primavera, verano, otoño e invierno) en que se realizaron las mediciones de estos indicadores de desempeño, el efecto de las cargas vehiculares y de las granulometrías de las CR.

3 Casos de estudio

Los cuatro tramos carreteros se muestran en la Tabla 3 con las características climáticas y de tránsito correspondientes: tipo de camino/carretera, CR aplicada, superficie existente, temperatura media, vehículos pesados (%) y ESALS para 10 años.

Tabla 3. Características físicas de cada uno de los tramos.

Tramo	Tipo de camino o carretera	CR	Superficie existente	Temperatura media (°C)	Vehículos pesados (%)	ESALS** para 10 años (millones)
1	Carretera tipo B	MCI-F	Concreto Asfáltico	21.6	15.3	10.90
2	Camino tipo C	MCI-F	Concreto Asfáltico	13.9	6.0	1.04
3	Carretera tipo A	CASAA-F	Concreto Asfáltico	16.2	50.4	134.86
4	Carretera tipo A	RS	Concreto Asfáltico	14.0	15.5	25.2 -34.90 (tránsito variable)

ESAL's** = Ejes sencillos equivalentes de carga de 8.2 toneladas (por sus siglas en inglés)

3.1 Características de las capas de rodadura en frío

3.1.1 Macrocalafateo inducido y capa de rodadura de fricción (MCI-F)

En T1 y T2 fue aplicada una CR consistente en MCI-F conocida como Scrub Seal (por su nombre en inglés), el cual fue elaborado con emulsión asfáltica modificado con polímero de características particulares del sistema y riego de gravilla tipo 3A (9.5 mm).

3.1.2 CASAA en frío (CASAA-F)

En T3 la mezcla asfáltica para construcción del CASAA-F fue compuesta por emulsión asfáltica especial modificada con alta concentración de polímero (mayor al 6%) y mezcla asfáltica con estructura granulométrica de CASAA de tamaño nominal de 6.3 mm.

3.1.3 Riego de Sello (RS)



El RS fue colocado en el T4. En esta CR fue empleada emulsión asfáltica modificada con polímero (ECR 68P) y agregado pétreo con granulometría especial. El tamaño nominal del sello fue de 12.5 mm.

4 Evaluación de los pavimentos

En cada uno de los tramos carreteros fueron efectuadas mediciones con el equipo automatizado perfilómetro laser de pavimentos (Pathrunner XP) y con equipo de rueda oblicua (Mu-meter MK6). Los datos de MTX a partir de un perfilógrafo láser se miden a 80 kph. y los datos de CF fueron obtenidos a una velocidad de operación de 65 kph. El objeto de estas mediciones es la de monitorear el desempeño de cada una de estas capas de rodadura ante la acción de las cargas vehiculares y los efectos medioambientales. Estas mediciones se realizaron en las cuatro diferentes estaciones del año después de la aplicación de los sistemas con el objeto de verificar su incidencia en el comportamiento de las capas de rodadura. En la Figura 1 se muestra la periodicidad de mediciones de indicadores de desempeño de estas capas de rodadura en frío.

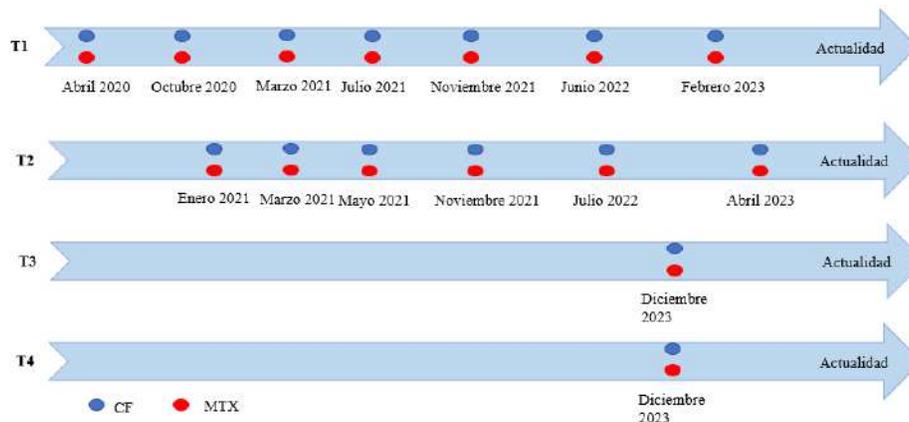


Figura 1. Periodicidad de mediciones con equipos de alto rendimiento en capas de rodadura en frío.

5 Análisis de Resultados

5.1 Tramo 1 (T1), MTX y CF

En la Figura 2 se muestra el histórico de mediciones de MTX para el MCI-F en T1. De manera general puede indicarse que del km 49+100 al km 49+900 los resultados de MTX en las distintas campañas de medición cumplen con el umbral mínimo de aceptación para proyectos de conservación plurianual de carreteras (mínimo 0.75 mm). Se observa como la MTX en los metros iniciales aplicados (386 m) del km 48+714 al km 49+100 presenta condiciones por debajo del umbral mínimo para octubre 2020, marzo 2021 y febrero 2023. En estos metros iniciales son cuando se ajustaron las practicas constructivas y el equipo de aplicación genera experiencia. Como referencia, del km 48+300 al km 48+714 no se tiene aplicación de esta capa de rodadura y es notorio el bajo nivel de MTX del pavimento. El valor mínimo de MTX obtenido de todas las mediciones fue de 0.47 mm y el valor máximo de 1.63 mm (COV fue de 9.7 a 26.7%). Según Vargas (2019 [8].), la MTX nos permite

evaluar la vida útil de cada uno de los tratamientos cuando los valores de MTX llegaran a la condición original del pavimento antes de su aplicación. En este caso el tratamiento no ha llegado al final de su vida útil, tomando como referencia el valor de MTX antes de la aplicación del tratamiento (círculo rojo en Figura 2). Estas mediciones tienen una variación dado que los sistemas láser del perfilógrafo no se proyectan en la misma área superficial del pavimento aunado a un acomodo físico del material y a las variaciones estacionales que se comentarán en el siguiente apartado.

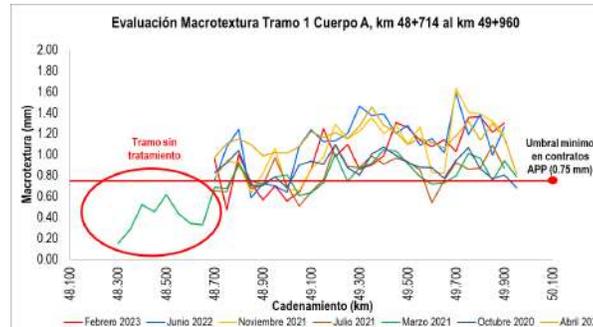


Figura 2. Histórico mediciones de MTX en MCI-F en T1 en cuerpo A.

En la Figura 3 se muestra el historico de mediciones de CF para el MCI-F en T1. En términos generales los valores de CF para todas las campañas de medición cumplen con los umbrales estipulados en contratos plurianuales de conservación de carreteras. Los valores máximos de CF correspondieron a las mediciones realizadas en octubre de 2020 (otoño). Los valores mínimos de CF se obtuvieron en marzo 2021 (primavera). Según Masad *et al* 2009 (citado por Flores 2010 [9].), en verano se presentan los niveles más bajos de fricción, debido a que el clima seco permite la acumulación de partículas finas y polvo que aceleran el pulido de la superficie del pavimento. En invierno, la lluvia lava las partículas finas y esto da como resultado una microtextura y macrotextura más alta y consecuentemente la superficie del pavimento presenta una fricción alta. En la Figura 3 se puede observar que los valores de CF concuerdan con lo establecido por Masad respecto a la estacionalidad. Valores bajos de CF son obtenidos antes de la temporada de lluvia. Valores altos de CF son obtenidos después de la temporada de lluvias. El valor mínimo de CF obtenido de todas las mediciones fue de 0.40 y el valor máximo de 0.68 (COV de 2.1 a 5.7%). Desde su aplicación en julio del 2019 a junio de 2023 (3 años y 11 meses), se han aplicado de manera estimada 4,340,193 ESALS.

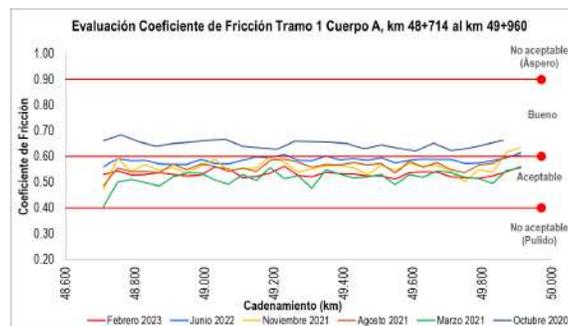


Figura 3. Histórico mediciones de CF en MCI-F en T1 en cuerpo A.

Otro de los beneficios encontrados con el sistema MCI-F es la mitigación del agrietamiento. En la Figura 4 se muestra la condición actual que presenta el sistema MCI-F en T1. El agrietamiento mostrado en el acotamiento ha sido mitigado por el sistema. Es decir, el agrietamiento no ha evolucionado en el carril donde se aplicó esta capa de rodadura.



Figura 4. Condición actual del sistema MCI-F en Tramo 1 (2023).

5.2 Tramo 2 (T2), MTX y CF

En la Figura 5 se muestra el histórico de mediciones de MTX para el MCI-F en ambos carriles de circulación. Hay zonas donde la condición de la MTX está en condiciones de regular a mala (zonas de topes). No obstante, y de manera general los valores de MTX están dentro del umbral de aceptación de contratos de conservación plurianual de carreteras (mínimo 0.75 mm). Como referencia existe un pequeño tramo donde no se aplicó esta capa de rodadura y su valor de MTX está por debajo del umbral mínimo de aceptación comentado. El valor mínimo de MTX obtenido de todas las mediciones fue de 0.55 mm y el valor máximo de 2.91 mm (COV 9.3 a 29.3%). En este caso también se observa el efecto de la estacionalidad en los valores obtenidos de MTX.

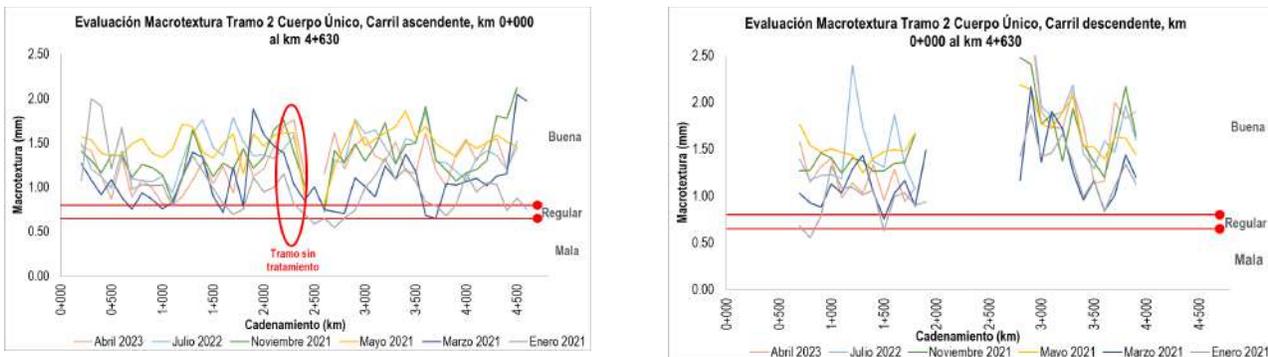


Figura 5. Histórico mediciones de MTX en MCI-F en T2 en cuerpo único y en ambos carriles de circulación.

En la Figura 6 se muestra el histórico de mediciones de CF para el MCI-F en ambos carriles de circulación. En términos generales los valores de CF en todas las épocas del año cumplen con el umbral mínimo de contrato en esquemas de conservación plurianual de carreteras (0.40 a 0.60). El valor mínimo de CF obtenido de todas las mediciones fue de 0.41 y el valor máximo de 0.74 (COV

de 6.4 a 12.9%). Desde su aplicación en abril del 2021 a junio de 2023 (2 años y 2 meses), se han aplicado de manera estimada 228,800 ESALS.

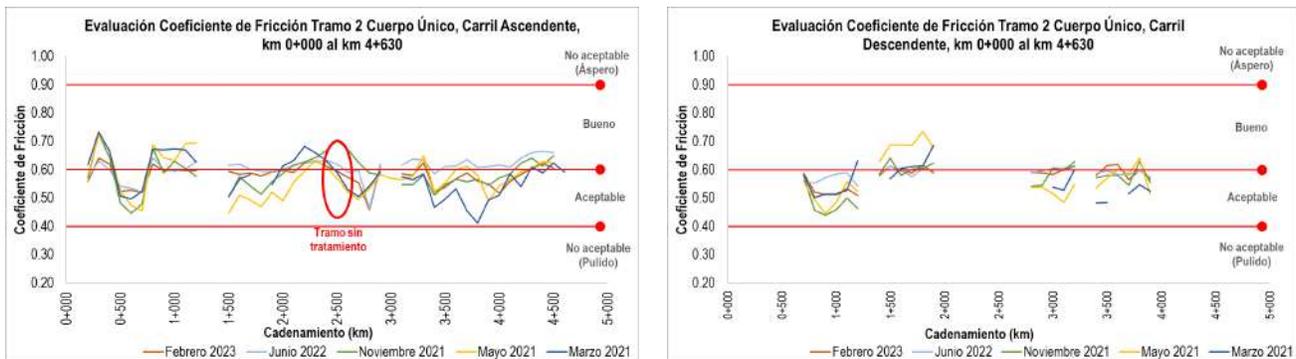


Figura 6. Histórico mediciones de CF en MCI-F en T2 en cuerpo único y en ambos carriles de circulación.

En la Figura 7 se muestra la condición actual que presenta el sistema MCI-F en T2. El pavimento presenta condiciones adecuadas y no se aprecian deterioros.



Figura 7. Condición actual del sistema MCI-F en T2 (2023).

5.3 Tramo 3 (T3), MTX y CF

En la Figura 8 y Figura 9 se muestran las mediciones de MTX para el CASAA-F en un sentido de circulación para 4 subtramos y renombrados para facilitar su interpretación tomando como referencia el km 0+000. Los valores de MTX cumplen con el umbral mínimo de contrato en esquemas de conservación plurianual de carreteras (0.75 mm, mínimo). El valor mínimo de MTX obtenido fue de 0.90 mm y el valor máximo de 1.32 mm (COV de 3.4 a 10.8%). Es importante continuar con las mediciones de MTX en otras estaciones del año para generar un comparativo de resultados y para establecer la vida útil de esta capa de rodadura cuando la MTX regrese al umbral de la condición inicial del pavimento antes de la aplicación del sistema.

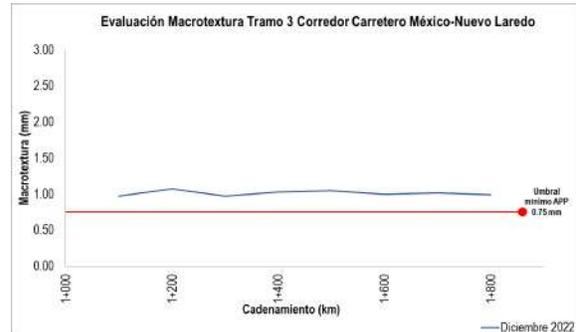
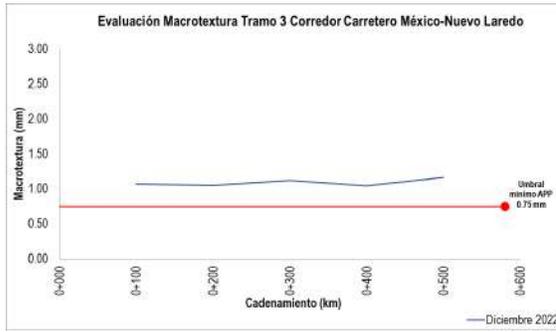


Figura 8. Mediciones de MTX en CASAA en frío en T3, subtramo I y II.

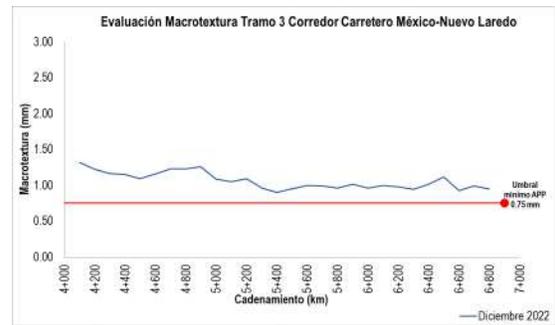
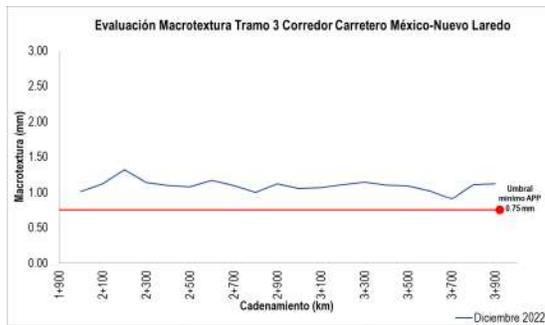


Figura 9. Mediciones de MTX en CASAA en frío en T3, subtramo III y IV

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra las mediciones de CF para el CASAA-F. Los valores de CF cumplen para todos los subtramos con el umbral mínimo de contrato en esquemas de conservación plurianual de carreteras (0.40 a 0.60). El valor mínimo de CF obtenido fue de 0.53 y el valor máximo de 0.62 (COV de 0.5 a 3.1%). Es importante continuar con las mediciones de CF en otras estaciones del año para generar un comparativo de resultados.

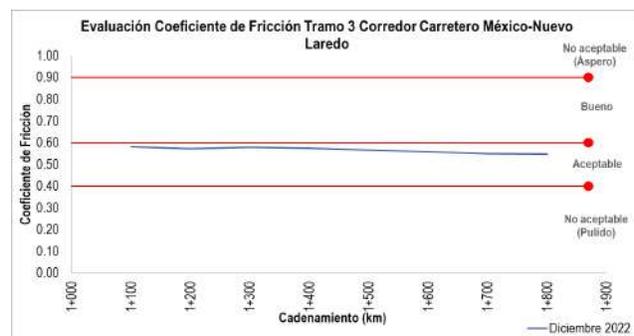
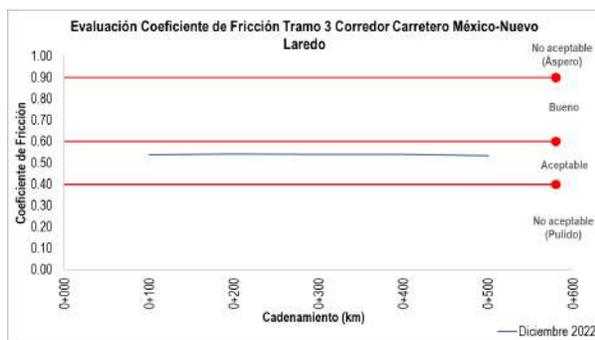


Figura 10. Mediciones de CF en CASAA-F en T3 subtramos I y II.

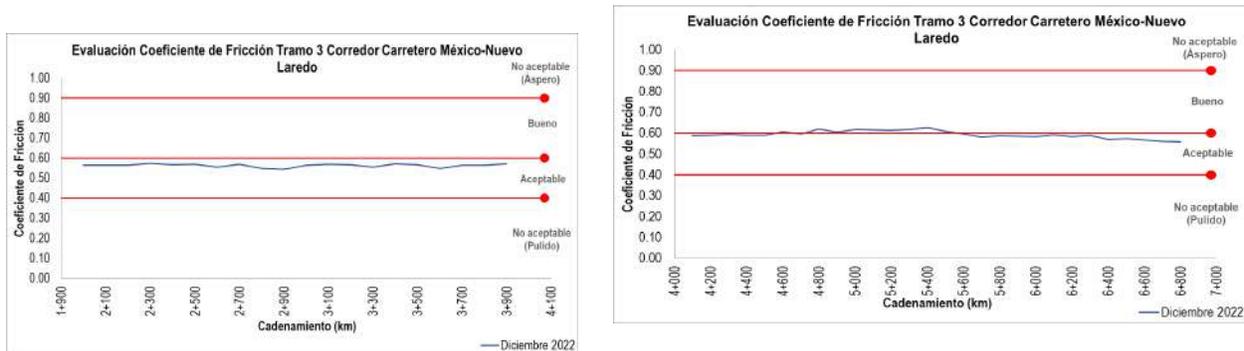


Figura 11. Mediciones de CF en CASAA-F en T3 subtramos III y IV.

La Figura 12 muestra la condición actual del CASAA-F donde no se aprecian fallas. Desde su aplicación en noviembre de 2022 a junio de 2023 (6 meses), se han aplicado de manera estimada 6,658,012 ESALS



Figura 12. Condición actual del sistema CASAA-F en T3 (2023).

5.4 Tramo 4 (T4), MTX y CF

En la Figura 13 y Figura 14 se muestran las mediciones de MTX para el RS en tramos aislados en un sentido de circulación. En términos generales los valores de MTX cumplen con el umbral mínimo de contrato en esquemas de conservación plurianual de carreteras (0.75 mm, mínimo). El valor mínimo de MTX obtenido fue de 1.31 mm y el valor máximo de 3.33 mm (COV de 6 a 16.6%). Es importante continuar con las mediciones de MTX en otras estaciones del año para generar un comparativo de resultados y para establecer la vida útil de esta capa de rodadura cuando la MTX regrese al umbral de condición inicial del pavimento antes de la aplicación del sistema.

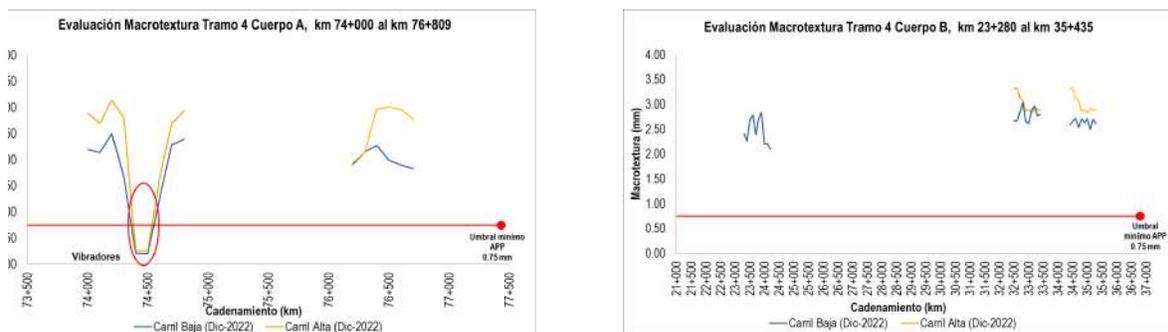


Figura 13. Mediciones de MTX en RS en T4.

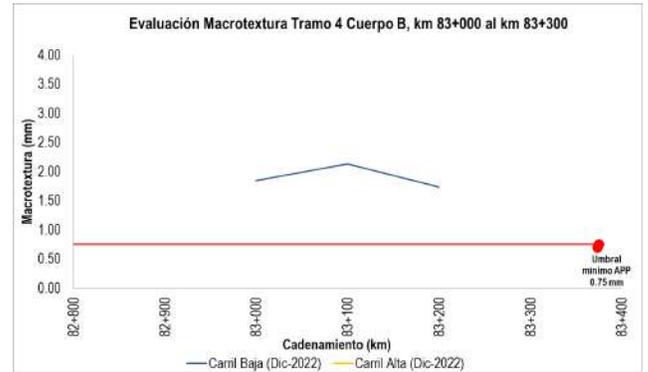
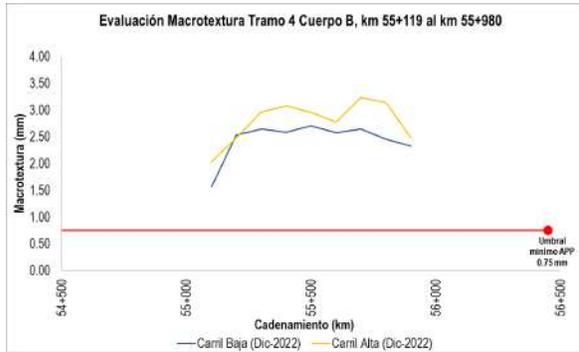


Figura 14. Mediciones de MTX en RS en T4 (continuación).

En la Figura 15 y Figura 16 se muestra las mediciones de CF para el RS. Los valores de CF cumplen para todos los subtramos con el umbral mínimo de contrato en esquemas de conservación plurianual de carreteras (0.40 a 0.60). El valor mínimo de CF obtenido fue de 0.55 y el valor máximo de 0.65 (COV de 1.3 a 3.8%). Desde su aplicación en julio de 2022 a junio de 2023 (12 meses), se han aplicado de manera estimada de entre 2,152,075 a 2,982,446 ESALS.

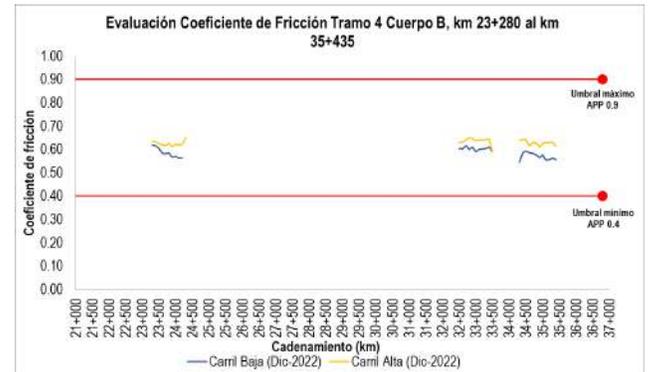
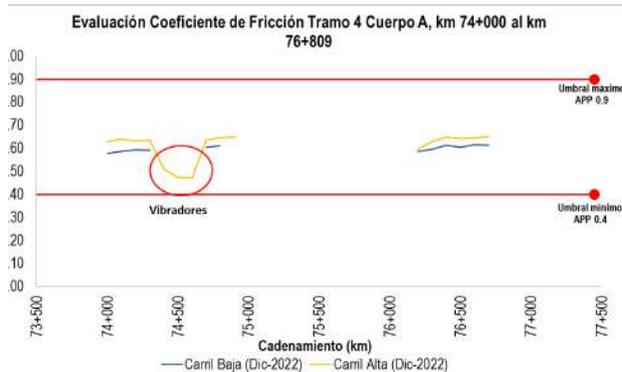


Figura 15. Mediciones de CF en RS en T4.

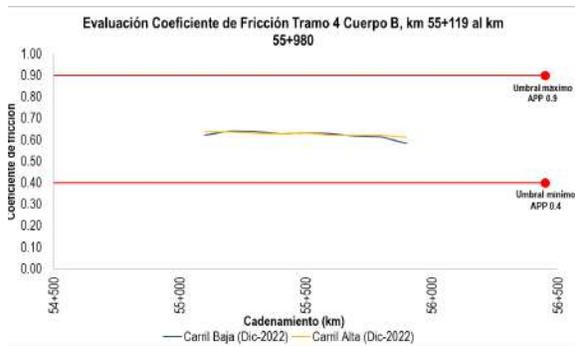


Figura 16. Mediciones de CF en RS en T4 (continuación).

La Figura 17 muestra la condición actual del RS donde no se aprecian fallas.



Figura 17. Condición actual del sistema RS en T4 (2023).

6 Evaluación del efecto de la granulometría de las CR

Como se puede observar en la Tabla 4 la granulometría en la CR tiene un efecto directo en la MTX y CF. Los valores más altos de MTX y CF se presentan cuando se tiene un tamaño nominal (TN) mayor.

Tabla 4. Granulometrías de CR.

Tramo	CR	Tamaño nominal del agregado (TN) mm	CF global de todas las mediciones	MTX global de todas las mediciones (mm)
1	MCI-F	9.5	0.56	0.98
2 (Sentido Ascendente)	MCI-F	9.5	0.58	1.27
2 (Sentido Descendente)	MCI-F	9.5	0.57	1.45
3	CASAA-F	6.3	0.57	1.06
4	RS	12.5	0.61	2.50

7 Conclusiones

Del estudio de indicadores de desempeño de las CR en frío evaluadas en distintas temporadas del año y tomando en consideración los efectos del tránsito se tienen las siguientes conclusiones:

- Para entender el comportamiento funcional de las CR es necesario llevar a cabo campañas de auscultación para determinar su evolución en el tiempo ante la acción de cargas y efectos medioambientales.
- Las CR en frío empleadas en estos casos de estudio, mejoraron los valores de MTX y CF del pavimento.
- En términos generales, los resultados de los CF y MTX evaluados cumplen con los umbrales establecidos en los contratos de conservación de pavimentos.
- Los resultados de MTX y CF están influenciados directamente por la estacionalidad de las mediciones. Las evaluaciones realizadas antes de la temporada de precipitaciones pluviales dan como resultado valores de menor magnitud de MTX y CF comparados con los realizados posteriormente.
- El tamaño nominal del agregado genera mayores valores de MTX y CF.
- Ninguna de las CR ha llegado al final de su vida útil. A la fecha actual no se puede estimar el efecto que tiene el tránsito en la durabilidad de las CR en frío.



- Las evaluaciones adicionales de MTX y CF que se realicen nos permitirán entender las ventajas y limitaciones de cada una de las CR durante el análisis del ciclo de vida.

8 Trabajos futuros

Se continuará monitoreando el comportamiento de las CR con la finalidad de conocer su evolución y desempeño en el tiempo ante la aplicación de cargas vehiculares y efectos medioambientales, así como su durabilidad como alternativas de solución en pavimentos asfálticos.

9 Referencias

- [1] Wilson, B., Scullion, T., P.E., Estakhri, C., Arellano, M., P.E., Blackmore, T., P.E. (2015) *Thin Overlays Guidelines: Project Selection, Design, and Construction*. Texas A&M Transportation Institute & Texas Department of Transportation, Austin District, Texas Department of Transportation, and the Federal Highway Administration.
- [2] Wisler, L. (2011) *Results of Long-Term Pavement Performance SPS-3 Analysis: Preventive Maintenance of Flexible Pavements*, TechBrief FHWA-HRT-11-049, Federal Highway Administration
- [3] Newcomb, D.E. (2009) *Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation*, NAPA IS 135
- [4] Watson, D., M. Heitzman (2014) *Thin Asphalt Concrete Overlays — A Synthesis of Highway Practice*, NCHRP Synthesis 464
- [5] West, R.C., et al. (2011) *Laboratory Refinement and Field Validation of 4.75 mm Superpave Designed Asphalt Mixtures*, Volume 1, NCAT Report 11-01
- [6] Anderson, R.M. (2014) *Optimal Timing of Preventive Maintenance for Addressing Environmental Aging in Hot-Mix Asphalt Pavements*. Minnesota Report MN/RC 2014-45
- [7] Staiano, M.A. (2015) *Implications of Tire Pavement Noise & Texture Measurements*, TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers, Paper Number 15-1868
- [8] Vargas-Nordbeck, A., M. C. Vrtis, and B. Worel. (2019) *Performance of Chip Seal Treatment in two different climatic regions*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C.
- [9] Flores, M. (2010) *Comparación de valores de fricción con péndulo británico y de pulido de agregados en tramos carreteros críticos del estado de Coahuila*. Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Proyecto No. IE 14/08, Querétaro, México.