



## ANÁLISIS DE FRICCIÓN Y MACROTEXTURA EN DIFERENTES SUPERFICIES DE RODADURA, CASOS DE ESTUDIO

Misael Hernández García<sup>1</sup>, Luis Guillermo Loria-Salazar<sup>2</sup>,  
Roberto I. Hernández Domínguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEVITER, Querétaro, México, misael.hernandez@ceviter.com.mx

<sup>2</sup> Universidad Isaac Newton, San José, Costa Rica, lloria@uin.cr

<sup>3</sup> CEVITER, Querétaro, México, roberto.hernandez@ceviter.com.mx

### Resumen

Niveles óptimos de fricción y macrotextura son preocupaciones fundamentales en la evaluación de características de seguridad de la superficie de rodadura como parte de los procesos de gestión de pavimentos. Este trabajo analiza datos de fricción (CF) y macrotextura (PMTE, mm) evaluados mediante equipo de alto desempeño, en cuatro casos de superficies de rodadura nueva (CASAA, SMA, Riego de Sello Premezclado-RSP y carpeta asfáltica de granulometría densa-CAGD), colocadas en 6 segmentos carreteros del noreste de México, como parte de trabajos de conservación, a fin de comparar el desempeño e identificar la naturaleza de correlación de ambos parámetros. Se analizan 440 secciones de 200 m cada una. El análisis bajo criterios de la normativa mexicana indican que superficies tipo CASAA y RSP muestran el mejor desempeño “aceptable” de CF y PMTE. El análisis de correlación PMTE-CF incluyendo todas las secciones muestra una correlación negativa y débil. Al agrupar las secciones por PMTE, la correlación es positiva y de fuerza moderada cuando PMTE < 0.75 mm, mientras que es positiva y débil cuando PMTE está entre 0.75-0.90 mm. Cuando PMTE > 0.90 mm, la relación es negativa y moderada. En 23% de todas las secciones la PMTE es “mala” (< 0.75 mm) y de estas, el 54.5% presenta CF no satisfactorio (< 0.41). La correlación por tipo de superficie de rodadura sólo es positiva y de fuerza moderada en un caso de RSP cuando los valores de PMTE son todos mayores a 2 mm. En el resto de las superficies la relación es negativa y pobre. El aumento del efecto de piscina de agua sellada a medida que aumenta la PMTE podría estar influyendo en la naturaleza de las relaciones observadas. Los resultados podrían orientar la toma de decisiones en procesos de gestión de pavimentos respecto al empleo de capas de rodadura.

**Palabras Clave:** Superficies de rodadura; Fricción; Macrotextura; Desempeño y Correlación; gestión de pavimentos.



## 1 Introducción

La seguridad al conducir en carretera está relacionada con distintos factores entre los que pueden incluirse el vehículo, el factor humano, factores ambientales y el propio estado de la superficie del pavimento.

Desde esta última perspectiva, se sabe que la correcta interacción neumático-superficie de rodamiento está altamente determinada por la fricción del pavimento, que se refiere a la fuerza que resiste el movimiento relativo entre el neumático de un vehículo y una superficie de pavimento y se evalúa mediante un coeficiente de fricción (CF) adimensional que se define como la fuerza que resiste el movimiento dividida por la carga vertical [1].

La fricción del pavimento en condiciones secas es generalmente alta, pero la presencia de una película de agua incluso muy delgada reduce drásticamente el CF. Por lo anterior, la fricción en los pavimentos se evalúa en condiciones de superficie húmeda. Entre otros factores, la fricción depende de: condiciones ambientales, características del neumático, parámetros operativos del vehículo, así como de las características de la superficie del pavimento entre las cuales la textura superficial que se refiere a las irregularidades de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana verdadera es el parámetro más importante [2].

PIARC establece tres niveles de textura: Micro, Macro y Mega-Textura, de los cuales los dos primeros niveles definen la fricción. La microtextura se refiere a textura con longitudes de onda menores a 0.5 mm y corresponde particularmente a la textura superficial de los agregados, mientras que la macrotextura considera longitudes de onda entre 0.5 y 50 mm y depende de las propiedades de la mezcla, principalmente la forma, tamaño y proporción de agregados y la ubicación de estos en relación con la superficie del pavimento [1].

El efecto de la textura en la fricción se entiende a partir de dos fenómenos: adherencia e histéresis. La primera depende de la microtextura y resulta de la unión a pequeña escala del caucho del neumático del vehículo y los agregados, es una función de la resistencia al corte de la interfase y del área de contacto y su efecto en la fricción es mayor a bajas velocidades, en superficies húmedas o secas y de textura suave [3].

Por otra parte, la histéresis depende de la macrotextura y resulta de la pérdida de energía del caucho del neumático cuando es desgastada sobre y alrededor de los agregados. Esta tiene un efecto mayor a velocidades altas y en superficies húmedas y de textura rugosa [3]. La histéresis aumenta exponencialmente con la velocidad y a velocidades superiores a 105km/h, puede representar más del 95 por ciento de la fricción [1].

Adicionalmente, la macrotextura revierte alta importancia porque a velocidades altas facilita el drenaje del agua permitiendo reestablecer condiciones de adherencia [1], lo cual contribuye a reducir el fenómeno de acuaplaneo, que ocurre a altas velocidades cuando la película de agua que cubre la superficie del pavimento supera los 0.5 mm y constituye un fenómeno peligroso pues el conductor pierde el control del vehículo pudiendo sufrir un hecho de tránsito [4].

Desde la gestión de pavimentos, los niveles de fricción y macrotextura son preocupaciones fundamentales en la evaluación de características de seguridad de la superficie de rodadura. En este sentido, entender la forma en que los dos parámetros se relacionan y desempeñan en diversos tipos capa de rodadura comunes, posibilita ampliar la comprensión de su naturaleza.

En general, se ha reportado que la relación macrotextura- fricción es positiva [3], es decir, a mayor macrotextura mayor fricción, sin embargo esta relación también depende de otros factores como la velocidad [2] y se ha señalado que esta relación no es definitiva incluso puede variar según las características del pavimento en diferentes casos de estudio [5].

En este contexto, un estudio en superficies de carpeta asfáltica [6], analizó secciones de control en carreteras de Luisiana confirmando que la influencia de la macrotextura sobre la fricción es más fuerte ( $R^2=0.38$ ) a velocidades altas ( $>70$  km/h) en contraste con velocidades bajas ( $R^2=0.15$ ) y el sentido de la relación puede ser tanto positivo como negativo.

Sobre esta línea, otra investigación [7] identificó que la correlación entre fricción (SN40R) y macrotextura (Mean Profile Depth MPD) en 5 superficies de rodadura nuevas, resultaba positiva para valores de MPD inferiores a 0,75 mm, hasta alcanzar un valor máximo de SN40R en MPD=0.8, luego la correlación era negativa a medida que aumenta el MPD hasta que esté cerca a 1,1 mm.

Por su parte, en [5], se evaluaron superficie de rodadura de carpeta asfáltica en Texas. En el análisis se evaluó tanto el efecto de la micro como de la macrotextura. Los resultados confirmaron que no existe una relación única textura-fricción. En el análisis particular relativo a Macrotextura, cuando los datos se evaluaron en conjunto, la relación fue negativa y de efecto muy pobre ( $R^2=0.05$ ), sin embargo, cuando los datos se evaluaron en subgrupos con iguales características de mezcla asfáltica, las relaciones fueron todas positivas y mejoraron ampliamente su efecto ( $R^2=0.39 - 0.64$ ).

Un trabajo más reciente [8] evaluó secciones en carreteras de Croacia, estas evaluaron LFC y MPD antes y después de tratamientos de conservación, el análisis de los datos conjuntos mostraron una relación positiva pero débil, al separarlos, los datos antes del tratamiento mostraron una relación negativa y moderada, mientras que los datos después del tratamiento mostraron una relación positiva pero muy débil.

Los trabajos señalados [5,6,7,8], entre otros, han ampliado el conocimiento sobre la relación macrotextura-fricción bajo consideraciones específicas, sin embargo, considerando las limitaciones en cada caso, han señalado la pertinencia de ampliar el conocimiento considerando otros casos de estudio, lo que de hecho es una necesidad latente especialmente cuando los hallazgos posibilitan orientar decisiones en los procesos de gestión de pavimentos y comprender la naturaleza de parámetros que inciden en hechos de tránsito.

Al respecto, considerando que en México el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), registró oficialmente 336,040 hechos de tránsito terrestre en superficies de rodamiento pavimentadas en zonas urbanas y suburbanas en el año 2021, de los cuales 3,565 se debieron a malas condiciones del camino, el análisis del desempeño de fricción y macrotextura en superficies de pavimento revierte alta importancia debido a su influencia en la seguridad vial.

Por lo anterior, este trabajo analiza como casos de estudio, datos de fricción (CF) y macrotextura (PMTE, mm) evaluados mediante equipo de alto desempeño, en cuatro casos de superficies de rodadura nueva (CASAA, SMA, Riego de Sello Premezclado-RSP y carpeta asfáltica de granulometría densa-CAGD), colocadas en 6 segmentos carreteros del noreste de México, como parte de trabajos de conservación, a fin de comparar el desempeño e identificar la naturaleza de correlación de ambos parámetros.

## 2 Metodología

### 2.1 Segmentos carreteros de estudio

El análisis considera datos de macrotextura y fricción de 6 segmentos carreteros cuya superficie corresponde a alguna capa de rodadura de tipo Carpeta Asfáltica Superficial Altamente Adherida (CASAA), Stone Mastic Asphalt (SMA), Riego de Sello Premezclado (RSP) o Carpeta Asfáltica de granulometría Densa (CAGD).

Los segmentos son de longitud variable y todos corresponden a Autopistas de cuota en la región Noreste de México. Los datos analizados correspondieron a valores promedio de Macrotextura expresada mediante PMTE (mm) y Fricción expresada mediante CF, medidos en el carril de baja, en secciones consecutivas de 200 metros. Cada segmento a lo largo de toda su longitud presentaba condiciones homogéneas de capas de rodadura y de condiciones superficiales durante la evaluación de los parámetros. Todos los segmentos presentaban de 1 a 3 meses de apertura al tránsito durante la evaluación de los parámetros. Como antecedente se sabe que en todos los casos, las capas de rodadura integraron agregados de origen granítico y calizo, propio de la región. La medición de los parámetros en campo se realizaron entre 2021, 2022 y 2023. La Tabla 3 muestra un resumen de los segmentos.



Tabla 1. Relación de segmentos de análisis

Segmento	Superficie de rodadura	Longitud (Km)	Secciones de análisis (200 m)
1	CASAA	30	150
2	SMA	16.8	84
3	SMA	6	30
4	RSP	16.6	83
5	RSP	5.6	28
6	CAGD	13	65
Total		88	440

## 2.2 Medición y evaluación de parámetros en las superficies de rodadura

### 2.2.1 Medición y evaluación de la fricción

La medición y evaluación de la fricción se llevó bajo los lineamientos de la norma SICT aplicable [9], que establece los criterios y procedimientos para la determinación del coeficiente de fricción (CF) de los pavimentos en carreteras en operación en México, así como para la clasificación de la condición superficial del pavimento, en función de los valores de CF obtenidos en cada sección (ver Tabla 2).

La medición del CF se llevó a cabo mediante equipo de alto rendimiento, verificado, del tipo rueda oblicua (Mu Meter), considerando la norma SICT aplicable [10].

Tabla 2. Clasificación de condición superficial de la superficie de rodadura en función del CF

Condición de la superficie	Autopistas, corredores carreteros, red básica libre y red secundaria
No satisfactorio (pulido)	0 a 0.40
Aceptable	0.41 a 0.60
Bueno	0.61 a 0.90
No satisfactorio (áspero)	> 0.90

Fuente: [9]

### 2.2.2 Medición y evaluación de la macrotextura

La medición y evaluación de la macrotextura se llevó bajo los lineamientos de la norma SICT aplicable [11], que establece los criterios y procedimientos para la determinación de la macrotextura expresada en milímetros (mm) mediante la Profundidad Media de la Textura Estimada (PMTE) de los pavimentos en carreteras en operación en México, así como para la clasificación de la condición superficial del pavimento, en función de los valores promedio de PMTE obtenidos en cada sección (ver Tabla 3). Para la clasificación de las secciones de análisis se consideró la categoría “Autopistas de cuota”.

La medición de la PMTE se llevó a cabo mediante equipo de alto rendimiento, verificado, del tipo perfilómetro inercial laser, considerando la norma SICT aplicable [12].

Tabla 3. Clasificación de condición superficial de la superficie de rodadura en función de la PMTE

Condición superficial	Rango de valores PMTE (mm)	
	Autopistas de cuota y corredores carreteros	Red básica libre y red secundaria
Buena	> 0.90	> 0.80
Regular	0.75 a 0.90	0.65 a 0.80
Mala	< 0.75	< 0.65

Fuente: [11]

## 2.3 Análisis de los datos

Se empleó análisis gráfico y estadística descriptiva para identificar el desempeño del CF y la PMTE. El análisis se complementó con análisis de correlación lineal para identificar la relación entre ambos parámetros evaluados, tanto considerando la totalidad de secciones como por separado, considerando las secciones en cada segmento de análisis.

## 3 Resultados

### 3.1 Desempeño de la fricción y macrotextura en las superficies de rodadura

La Figura 1 presenta el gráfico de desempeño de la fricción en los diferentes segmentos evaluados, mientras que la Tabla 4 indica el porcentaje de secciones de cada segmento, por cada categoría de estado de la superficie de rodadura según su CF.

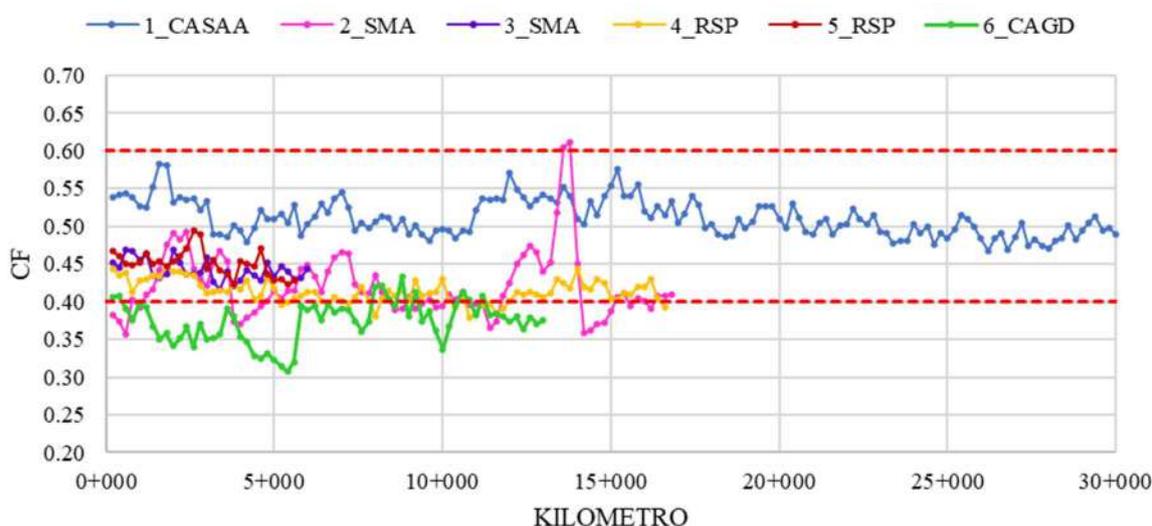


Figura 1. Desempeño del CF por cada tipo de superficie de rodadura

Tabla 4. Porcentaje de secciones por segmento, por estado de la superficie de rodadura según el CF

Valor de CF	Estado de la superficie	1_CASAA	2_SMA	3_SMA	4_RSP	5_RSP	6_CAGD
0 a 0.40	Pulido (N.S.)	0.0	50	0	43.4	0	89.6
0.41 a 0.60	Aceptable	100.0	48.8	100	56.6	100	7.5
0.61 a 0.90	Bueno	0.0	1.2	0	0	0	0
> 0.90	Áspero(N.S.)	0.0	0.0	0	0	0	3.0

N.S.: No satisfactorio

De acuerdo con los resultados, la superficie 6\_CAGD presenta el mayor porcentaje de secciones con CF no satisfactorio y en su mayoría clasifican como “pulidas”. Por su parte, las superficies 2\_SMA y 4\_RSP, presentan alrededor del 50% de secciones “pulidas” y el otro 50% “aceptable”. Sólo las superficies 1\_CASAA, 3\_SMA Y 5\_RSP, presentan un 100% de secciones en la clasificación “aceptable”, siendo la superficie 1\_CASAA la que muestra el mejor desempeño de CF.

En los resultados resalta que en ningún caso de superficie de rodadura evaluada, se observen secciones con clasificación “buena” de CF, ni siquiera en 1\_CASAA. También es interesante que las superficies 3\_SMA y 5\_RSP, presenten mejores condiciones respecto a los segmentos 2\_SMA y 4\_RSP.

En este sentido, es importante subrayar que se tiene conocimiento que en todos los casos de segmentos evaluados, las mezclas asfálticas de las capas de rodadura emplearon materiales pétreos de los mismos bancos, con agregados de origen granítico y/o calizo, por lo que esta condición sugiere condiciones similares de microtextura en los diferentes tipos de capa de rodadura. Dicho antecedente, sumado a otras condiciones homogéneas en la evaluación de fricción, como velocidad, equipo de medición y temporada de evaluación, sugeriría otras variables influyendo en la variabilidad de CF en segmentos con mismo tipo de capa de rodadura.

Al respecto, es probable que un monitoreo preliminar del desempeño de la fricción en los segmentos 2\_SMA y 4\_RSP, haya motivado una corrección en el diseño de las mezclas o un cambio de materiales y/o procedimientos de colocación en los segmentos 3\_SMA y 5\_RSP.

Como parte de los resultados se subraya el deficiente CF observado en la superficie 6\_CAGD, lo cual evidencia su baja viabilidad para garantizar un desempeño óptimo respecto a requerimientos de CF, reafirmando con ello, la utilidad de otras capas de rodadura para satisfacer características mínimas de seguridad en superficies de rodadura.

Por otra parte, respecto a la macrotextura evaluada, la Figura 2 presenta el gráfico de desempeño de la PMTE (mm) en las diferentes Superficies de Rodadura de los segmentos evaluados. Para mejorar la escala de visualización, la Figura 3 presenta únicamente el desempeño de las superficies 1,2, 3 y 6. La Tabla 5 indica el porcentaje de secciones de cada segmento evaluado, por cada categoría de estado de la superficie de rodadura según su valor de PMTE.

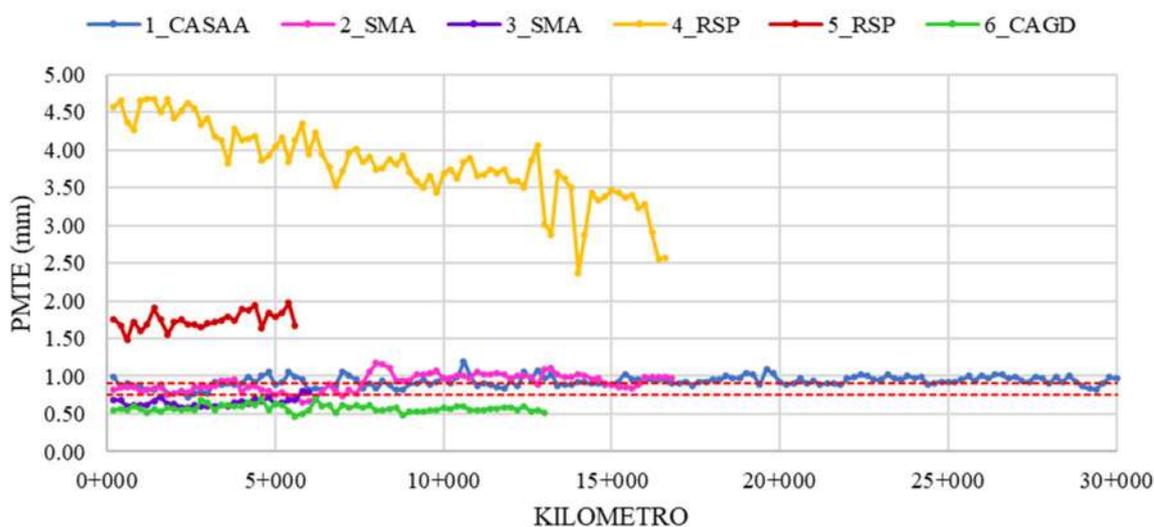


Figura 2. Desempeño de la PMTE por cada tipo de superficie de rodadura

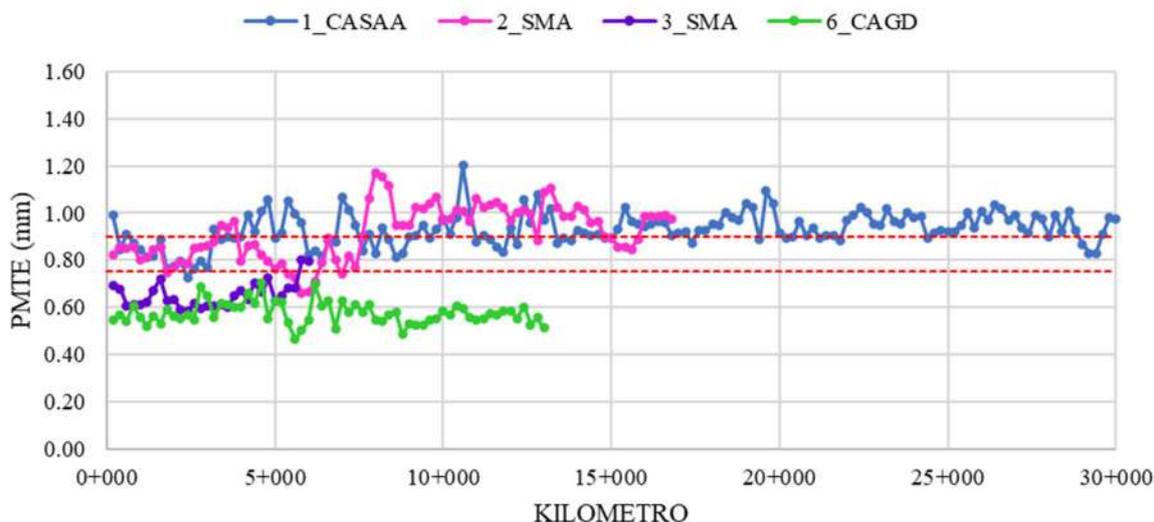


Figura 3. Desempeño de la PMTE en superficie de rodadura 1,2,3 y 6

Tabla 5. Porcentaje de secciones por segmento, por estado de la superficie de rodadura según la PMTE

PMTE (mm)	Estado de la superficie	1 CASAA	2 SMA	3 SMA	4 RSP	5 RSP	6 CAGD
> 0.90	Buena	68.7	51.2	0.0	100	100	0.0
0.75 a 0.90	Regular	30.7	40.5	6.7	0.0	0.0	0.0
< 0.75	Mala	0.7	8.5	92.9	0.0	0.0	100.0

En los resultados, la superficie 6\_CAGD presenta en su totalidad secciones con PMTE “mala”, seguida de las superficies 3\_SMA y 2\_SMA que presentan más del 90% y 8% de las secciones también en la clasificación de “mala”. La superficie 1\_CASAA presenta la mayoría de las secciones en clasificación “buena”, mientras que 4\_RSP y 5\_RSP clasifican la totalidad de secciones también en categoría buena

Resalta que la clasificación de estados de la superficie sea prácticamente opuesta entre los segmentos 2 y 3, ambos de superficie de rodadura SMA, y que en los segmentos 4 y 5 con superficie RSP la clasificación sea totalmente “buena” en ambos casos pero siendo distantes en los promedios generales de PMTE que son 3.82 mm y 1.74 mm, respectivamente. En general los resultados de macrotextura en los segmentos no manifiestan una asociación directa de este parámetro con la fricción, sólo en las superficies 1\_CASAA y 5\_RSP puede inferirse una fuerte asociación positiva y en 6\_CAGD una asociación negativa. Para confirmar dichas relaciones se realizó el correspondiente análisis de correlación.

### 3.2 Análisis de la relación fricción-macrotextura

#### 3.2.1 Relación macrotextura-fricción en la totalidad de secciones

La grafica de correlación Macrotextura (PMTE)- fricción (CF), se presenta en la Figura 4, donde se consideran los datos de la totalidad de secciones (440 secciones), sin considerar diferencias por tipo de superficie de rodadura.

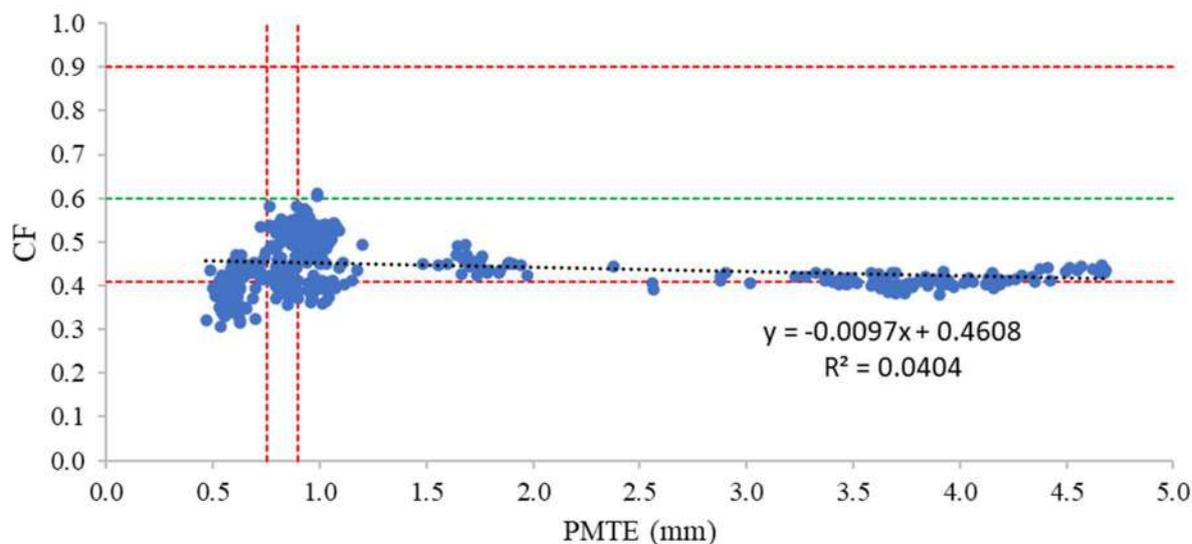


Figura 4. Relación de PMTE y CF considerando 440 secciones totales

El análisis de correlación muestra una asociación negativa débil entre PMTE y CF. Estadística complementaria indica que en 23% de todas las secciones la PMTE es “mala” ( $PMTE < 0.75$  mm) y de estas, el 54.5% son secciones con CF no satisfactorio ( $CF < 0.41$ ). Además en 58.41% de todas las secciones la PMTE es “buena” ( $PMTE > 0.90$  mm) y de estas, al menos el 87.5% son secciones con CF “aceptable” ( $CF = 0.41-0.60$ ).

De forma general se observa que los picos de CF se producen en el intervalo de PMTE de 0.75 a 1 mm, y después los valores de CF disminuyen a medida que se incrementa la PMTE hasta que esta alcanza un valor de 2 mm, a partir de donde la CF se mantiene prácticamente constante hasta el máximo valor de PMTE observado (4.7 mm). Estos resultados muestran un comportamiento altamente semejante al reportado en [7] para superficies de rodadura nuevas donde la fricción también se evaluó a velocidad promedio de 65 km/h.

Para profundizar en el análisis de las secciones, estas se evaluaron en tres grupos separados, para ello se consideraron tres categorías que se homologaron con las categorías de clasificación de estado de la superficie según la PMTE, en el caso de autopistas. Las gráficas de la relación PMTE-CF, por categoría de secciones se muestra en la Figura 5.

Los resultados muestran que en el grupo de secciones a)  $PMTE < 0.75$  y c)  $PMTE > 0.90$  mm, la relación PMTE-CF se vuelve fuerte pero positiva en el primer caso y negativa en el segundo. En el caso del grupo b)  $PMTE = 0.75-0.90$  mm, la relación también se vuelve positiva pero muy débil.

Para explicar la relación positiva en casos como el grupo a), se ha sugerido que el efecto relativamente “suave” de la MAC, es decir, el ligero aumento de esta no conduce a una disminución del área de contacto entre la superficie y el neumático y por lo tanto la contribución de histéresis por parte de la MAC ocurre de forma normal [7].

En casos contrarios como el caso c), se sugiere que la relación negativa puede deberse a que el incremento de MAC ocasiona un incremento del efecto del fenómeno de piscina de agua sellada, (“sealed water pool effect”) y una consecuente disminución del área de contacto entre superficie y neumático. Dicha condición reduce la contribución de la macrotextura y por ende el CF muestra una tendencia a la baja [7]. El fenómeno de piscina de agua sellada se refiere al efecto del agua atrapada en los “valles” que conforman la macrotextura de una superficie de rodadura que impiden que el neumático penetre en el “valle”, eliminando la contribución de los agregados en el “valle” a la fricción [13].

Para confirmar la influencia del efecto del fenómeno señalado, análisis complementarios podrían considerar la estimación del valor crítico de PMTE a partir del cual sería posible observar dicho efecto.

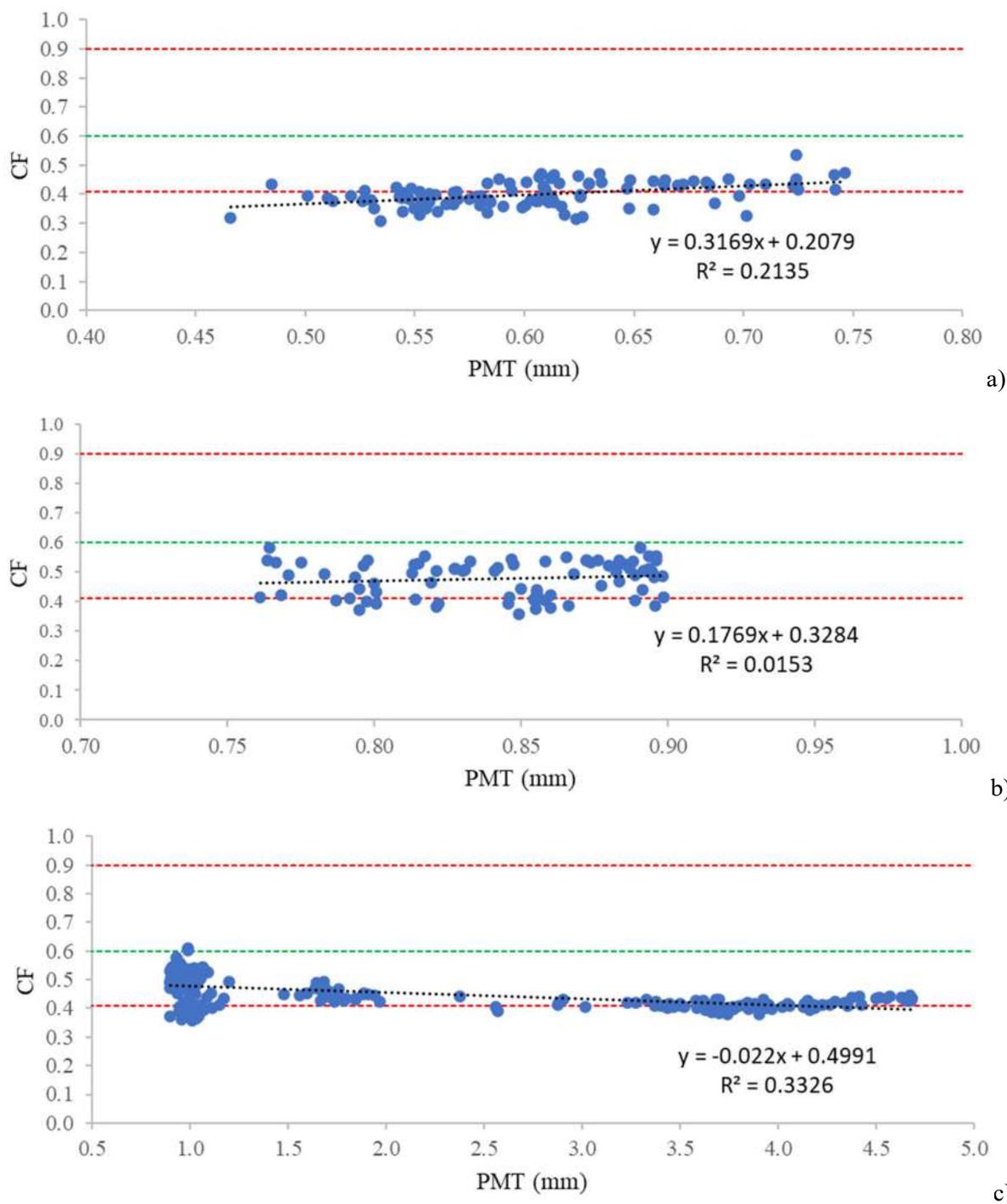


Figura 5. Relación de PMTE y CF en tres categorías de secciones; a)  $PMTE < 0.75\text{mm}$ , b)  $PMTE 0.75\text{-}0.90$  y c)  $PMTE > 0.90$

Para complementar el análisis de correlación y dado que cada segmento evaluado sugiere condiciones homogéneas en la superficie de rodadura de todas sus secciones correspondientes, el siguiente nivel de análisis de correlación consideró la diferenciación por superficie de rodadura.

### 3.2.2 Relación macrotextura-fricción por superficie de rodadura

La grafica de correlación Macrotextura (PMTE) - fricción (CF), por tipo de capa de rodadura se presenta en la figura 6. La grafica muestra que salvo en el caso de la superficie 4\_RSP, donde la relación es positiva y débil, el resto de las relaciones resultan también débiles pero negativas.

Los casos de superficies de rodadura con asociación de al menos  $R^2 > 0.05$  corresponden a 1\_CASAA ( $R^2=0.071$ ), 4\_RSP ( $R^2=0.092$ ) y 5\_RSP ( $R^2=0.124$ ). La superficie de rodadura 2\_SMA, representa el caso con la asociación más pobre ( $R^2=0.005$ ).

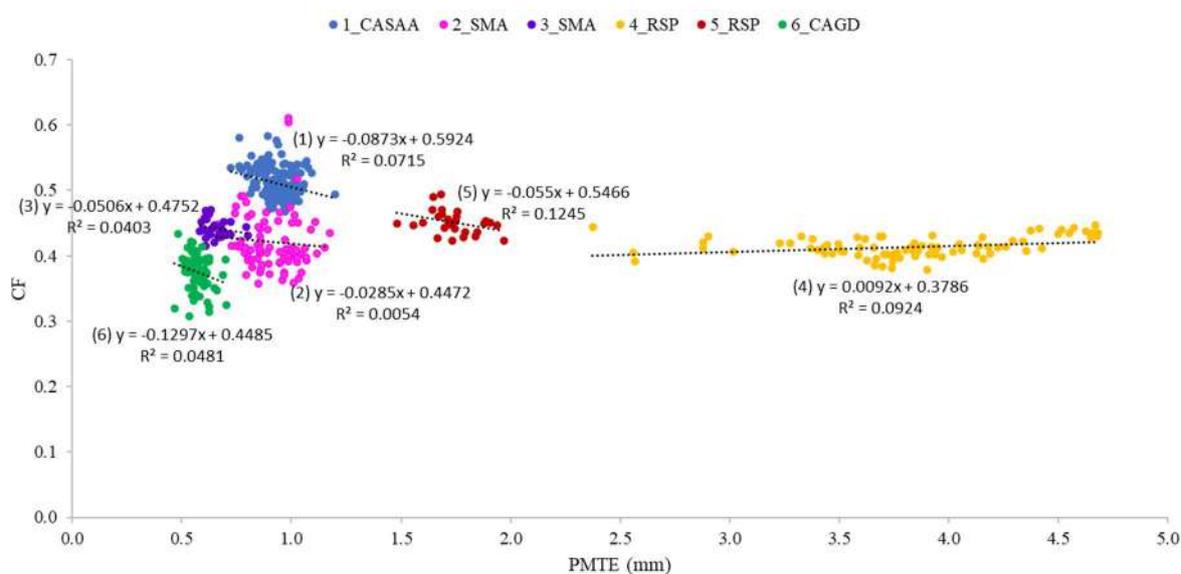


Figura 6. Relación de PMTE y CF considerando 440 secciones totales

Los resultados por tipo de capa de rodadura muestran comportamientos diferentes en la relación PMTE-CF, respecto al identificado en el análisis general. La mayoría de las relaciones resultan negativas y con un bajo coeficiente de correlación.

Ambas circunstancias podrían tener explicación en los factores señalados en [7], que relacionan el aumento de MAC con un aumento del efecto del fenómeno de piscina de agua sellada y de la disminución del área de contacto entre superficie y neumático reduciendo el efecto de histéresis por parte de la MAC. En el análisis por capa de rodadura sin embargo, este efecto estaría afectando desde las PMTE más bajas hasta un valor máximo de 2, donde la relación vuelve a ser positiva.

Los hallazgos en este nivel de análisis difieren respecto a los observados en [6] donde al hacer un análisis de secciones homogéneas con condiciones semejantes de superficie de rodadura encontraron en todos los casos relaciones positivas y de fuerza moderada. Es probable que la diferencia principal en los resultados se deba a que en el citado estudio los autores consideraron evaluaciones de CF a velocidades mayores o iguales a 72km/h confirmando de hecho un mayor efecto de la macrotextura a altas velocidades.

Para mejorar la comprensión de la relación PMTE-CF, análisis futuros también podrían considerar la variable velocidad, en la medición de CF, así como monitorear la variabilidad de los parámetros de estudio a través del tiempo, pudiendo incluir incluso el nivel de tránsito como variable de análisis.



### 3 Conclusiones

En este trabajo se analizaron datos de fricción (CF) y macrotextura (PMTE) de cuatro tipos de superficies de rodadura nuevas colocadas como tratamientos de conservación periódica en 6 segmentos carreteros en la región Noreste de México. Los datos correspondían a valores promedio para secciones de 200m y las superficies correspondían a capas de rodadura tipo CASAA, SMA, RSP y CAGD. El análisis incluyó la evaluación del desempeño de los parámetros así como el análisis de las relaciones observadas entre ambos.

Bajo los criterios de la normatividad mexicana, las superficies de rodadura 1\_CASAA y 5\_RSP muestran el mejor desempeño combinado de CF y PMTE, sin alcanzar en ninguno de los casos, secciones con clasificación de CF “Bueno”, sino únicamente “aceptable”. La superficie 6\_CAGD muestra el peor desempeño combinado.

Al considerar todas las secciones de estudio (440 secciones), la correlación PMTE-CF es negativa y débil. Al agrupar las secciones, la correlación es positiva y de fuerza moderada para valores de PMTE < 0.75 mm, mientras que es positiva y débil para valores de PMTE entre 0.75-0.90. Para valores mayores de PMTE > 0.90, la relación es negativa y moderada. En 23% de las secciones la PMTE es “mala” (PMTE < 0.75 mm) y de estas, el 54.5% son secciones con CF no satisfactorio (CF < 0.41). En 58.41% de las secciones la PMTE es “buena” (PMTE > 0.90 mm) y de estas, al menos el 87.5% son secciones con CF “aceptable” (CF = 0.41-0.60). Los picos más altos de CF se producen en el intervalo de PMTE de 0.75 a 1 mm, y después los valores de CF disminuyen a medida que se incrementa la PMTE hasta que esta alcanza un valor de 2 mm.

Al considerar el análisis de secciones por tipo de capa de rodadura, la mayoría de los casos muestran correlación negativa y de pobre a débil coeficiente de correlación ( $R^2$  min = 0.005, SMA y  $R^2$  máx. = 0.12, RSP). Sólo en los casos de PMTE mayor a 2 es posible observar relación positiva aunque débil.

Es probable que el aumento o descenso del efecto del fenómeno de piscina de agua sellada y la pérdida de contacto entre neumático y superficie a medida que aumenta la macrotextura este influyendo en las relaciones observadas entre PMTE y CF.

Los hallazgos en este trabajo deben considerar las limitaciones de la medición de los parámetros de CF y PMTE no controladas por los autores del análisis de datos, las particularidades de los agregados en la región de estudio y otras variables como el nivel de tránsito que no fue considerado en este análisis.

En contextos semejantes, los resultados permiten orientar la toma de decisiones en procesos de gestión de pavimentos respecto al empleo de capas de rodadura así como establecer criterios de monitoreo de CF en pavimentos a partir de valores preliminares de PMTE.

Si bien no se aprecia una correlación directa o relevante entre las variables aquí estudiadas, este trabajo muestra claramente los rangos de desempeño esperados en distintas capas de rodadura, que puede apoyar en la toma de decisiones a nivel gestión en las autopistas de la región estudiada.

### 3 Referencias

- [1] Hall, J.W., Smith, K.L., Titus-Glover, L., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rado, Z. (2009). *Document 108: Guide for Pavement Friction, Final Report for NCHRP Project 01-43*. NCHRP.
- [2] Roe, P. G., Parry, A. R. & Viner, H. E., (1998). *TRL 367 High and low speed skidding resistance: the influence of texture depth*, Wokingham: Prepared for Pavement Engineering Group, Highways Agency.
- [3] Siyu C., Xiyin L., Haoyuan L., Jiangmiao Y., Fuda C., Yang Z., Tao M., Xiaoming H. (2022). *A state of the art review of asphalt pavement surface texture and its measurement techniques*, Journal of Road Engineering, Volume 2, Issue 2, Pages 156-180, ISSN 2097-0498, doi.org/10.1016/j.jreng.2022.05.003.
- [4] Vaiana, R., Capiluppi, G. F., Gallelli, V., Iuele, T., & Minani, V. (2012). *Pavement Surface Performances Evolution: an Experimental Application*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 53, 1149–1160. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.964.
- [5] Zuñiga-García N., & Prozzi J.A., (2016). *Contributing of Micro- and Macro-Texture for Predicting Friction on Pavement Surfaces, Final Project Report*. Center for Highway Pavement Preservation.



- [6] Kargah-Ostadi, N., & Howard, A. (2015). *Monitoring Pavement Surface Macrot texture and Friction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2525, 111–117. doi:10.3141/2525-12.
- [7] Meegoda, J. N., & Gao, S. (2015). *Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2(6), 382–390. doi:10.1016/j.jtte.2015.09.001.
- [8] Pranjić, I., Deluka-Tibljaš, A., Cuculić, M., & Šurdonja, S. (2020). *Influence of pavement surface macrot texture on pavement skid resistance*. Transportation Research Procedia, 45, 747–754. doi:10.1016/j.trpro.2020.02.102.
- [9] N-CSV-CAR-1-03-007/20. *Determinación del coeficiente de fricción (CF)*. Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes.
- [10] M-MMP-4-07-010/17. *Determinación del coeficiente de fricción con equipo de rueda oblicua*. Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes.
- [11] N-CSV-CAR-1-03-006/20. *Determinación de la Macrot texture (MAC)*. Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes.
- [12] M-MMP-4-07-008-16. *Determinación de la Profundidad Media de la Macrot texture con Perfilómetro Laser*. Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes.
- [13] Persson, B. N. J., Tartaglino, U., Albohr, O., & Tosatti, E. (2005). *Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect*. Physical Review B, 71(3). doi:10.1103/physrevb.71.035428