

CUANTIFICACIÓN DE LA MACRO- Y MICRO-TEXTURA DEL PAVIMENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE FRICCIÓN

Natalia Zúñiga-García¹, Andre Smit², Jorge Prozzi³

¹ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, nzuniga@utexas.edu

² Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, asmit@utexas.edu

³ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, prozzi@mail.utexas.edu

Presentado en el XIX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA), Medellín, Colombia, Noviembre 2017.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación es analizar la textura de la superficie del pavimento y su influencia en la fricción, utilizando un láser de alta resolución que permite la recolección de información de textura a nivel macro y micro. Para el análisis se utilizaron mediciones de campo de fricción y textura sobre carreteras en servicio localizadas en Texas, Estados Unidos. La fricción se midió utilizando distintos métodos de ensayo: el péndulo británico, el ensayo de fricción dinámica y el micro-GripTester. La textura se cuantificó utilizando diferentes parámetros para los niveles macro y micro, entre ellos la profundidad de textura media, altura promedio, media cuadrática, y curtosis, entre otros.

La influencia de la macro- y micro-textura en la fricción se analizó utilizando modelos de regresión lineal múltiple. Los resultados del análisis indican que las mediciones de fricción son afectadas significativamente por ambos, la macro- y la micro- textura. La predicción de fricción mejoró significativamente cuando se utilizaron los dos niveles de textura en el péndulo británico y el ensayo de fricción dinámica. Adicionalmente, en este estudio, la profundidad media del perfil (MPD) representa el parámetro más apropiado para caracterizar macro- y micro- textura para modelar la fricción.

Palabras Clave: fricción, resistencia al deslizamiento, macro-textura, micro-textura.

1 Introducción

La fricción y la resistencia al deslizamiento del pavimento están directamente relacionadas con el número de accidentes viales, principalmente en condiciones de superficie húmeda. Por esta razón es importante para las agencias de tránsito la evaluación y monitoreo de la fricción o la textura. Las metodologías actuales de evaluación de fricción en el pavimento presentan una serie de desventajas, por lo que resultan imprácticas para estudios de campo en redes viales de gran tamaño. Por lo tanto, es importante valorar distintos métodos de estimación de la fricción basados en otras propiedades más prácticas y sencillas de evaluar.

La resistencia al deslizamiento está afectada principalmente por la textura de la superficie del pavimento, sin embargo, no se posee un método de cuantificación de este efecto en las propiedades finales de la resistencia al deslizamiento. La textura del pavimento puede ser clasificada en tres categorías principales basado en la amplitud y longitud de onda (λ). La primera categoría es la micro-textura ($\lambda < 0.5$ mm), que corresponde a la textura en pequeña escala de la superficie del agregado. La segunda categoría es la macro-textura ($0.5 < \lambda < 50$ mm), referente a la textura a larga escala del pavimento debido tipo de mezcla, y al acomodo y tamaño del agregado. La última categoría es la mega-textura ($50 < \lambda < 500$ mm), correspondiente a longitudes de onda del orden de la interfaz neumático-pavimento.

La macro- y micro-textura son los componentes claves necesarios para el desarrollo de las condiciones óptimas de resistencia al deslizamiento. La modelación empírica es el enfoque comúnmente utilizado para describir la influencia de los componentes de textura en la fricción de la superficie [1]. Muchas de las relaciones fricción-textura está basadas únicamente en macro-textura, o en medidas indirectas de micro-textura debido a la limitación de la medición de altas frecuencias (longitudes de onda bajas). Sin embargo, los avances recientes en tecnología permiten la recolección de datos de la superficie del pavimento en dos y tres dimensiones (2D y 3D) en alta resolución, por lo que es posible realizar una medida directa de micro-textura.

Estudios recientes han incorporado micro-textura a la predicción de la resistencia al deslizamiento, utilizando tecnología láser de no-contacto. Sin embargo, el mayor desafío está en la caracterización paramétrica de la textura [2, 3]. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación fue el análisis de las características de la textura del pavimento y su influencia en la fricción. Para esto se implementó un Escáner de Láser Linear o *Line Laser Scanner* (LLS) que permite la recolección de información de textura en alta definición, incluyendo macro- y micro-textura. Esto permite además la utilización distintos parámetros para caracterizar la textura.

1.1 Fricción y resistencia al deslizamiento

La fricción es la fuerza que resiste el movimiento relativo entre el neumático del vehículo y la superficie del pavimento [2]. La resistencia al deslizamiento es la habilidad de la superficie del pavimento de prevenir la pérdida de tracción con el neumático [5], comúnmente es estimada como el coeficiente de fricción multiplicado por 100 y se le conoce como el número de deslizamiento o *skid number* (SN). Existen dos tipos de mediciones de fricción, fricción lateral y fricción longitudinal. Muchos de equipos de medición de fricción se desarrollaron con base en la medición de la fuerza generada por un material, generalmente caucho, deslizado sobre la superficie. Los principales principios de operación de los equipos de medición de fricción son [6]: deslizamiento, coeficiente de fricción longitudinal y coeficiente de fricción lateral.

Los equipos basados en el principio de deslizamiento se utilizan para mediciones estacionarias puntuales, por lo que son utilizados mayormente en el laboratorio, o requieren de operativos de control de tránsito. Los más comunes son el ensayo de péndulo británico (BPT) [7] y el ensayo de fricción dinámica (DFT) [8]. El equipo del BPT es operado manualmente y consiste en la evaluación del coeficiente de fricción debido al contacto entre un péndulo con un deslizador de caucho estándar en el extremo y la superficie húmeda del pavimento, un puntero de arrastre indica el número del péndulo británico (BPN). La fricción es medida a una velocidad aproximada de 10 km/h [9], por lo que se considera un equipo de evaluación de fricción a baja velocidad. El DFT es un sistema modular, operado electrónicamente, que se utiliza para medir el torque necesario para rotar tres deslizadores de caucho en una trayectoria circular, a distintas velocidades. Los resultados son reportados en términos de velocidad versus fricción en unidades de número DFT (DFTN), en un rango continuo de velocidades de 20 a 80 km/h [5].

Los coeficientes de fricción longitudinal y lateral emplean equipos de tracción que utilizan una o dos ruedas de ensayo. El ensayo de la Rueda Bloqueada [10] es el método más utilizado comúnmente para medir la fricción longitudinal a alta velocidad en los Estados Unidos [4, 9]. Este ensayo se utiliza para medir la fricción bajo condiciones de frenado sin el sistema de frenos antibloqueo (ABS). Los ensayos de rueda parcialmente bloqueada simulan las condiciones con freno ABS, por ejemplo, los ensayos del GripTester y del micro-GripTester, que miden la fricción longitudinal de manera continua a lo largo de la superficie del pavimento, el resultado está dado en unidades de número de Grip (GN). Ambos equipos poseen una rueda equipada con un neumático con una banda de rodadura suave especial que se monta en un eje capaz de medir la resistencia horizontal [11]. El GripTester es remolcado por un vehículo y utiliza velocidades de 5 a 100 km/h, mientras que el micro-GripTester es utilizado manualmente a una velocidad recomendada de 2.5 km/h.

1.2 Textura

La textura del pavimento es la característica más importante de la superficie de las carreteras que determina la mayoría de las interacciones neumático-pavimento [9]. Existen distintas metodologías de medición y caracterización de la textura del pavimento.

1.2.1 Medición de la textura

Las metodologías de medición de la textura dependen del componente de textura a medir. La macro-textura, por ejemplo, puede ser descrita utilizando métodos indirectos como el Círculo de Arena, el Círculo de Grasa y el Drenómetro. El ensayo del Círculo o Parche de Arena [12] es el ensayo clásico para macro-textura, consiste en esparcir arena Ottawa o esferas de vidrio sólido sobre la superficie del pavimento de manera circular hasta formar un círculo, el volumen de la arena es dividido por el radio del círculo formado (medido en cuatro puntos distintos) y el valor es reportado como la profundidad de textura media o *mean texture depth* (MTD).

Actualmente no existe una metodología estándar para la medición de la micro-textura, los estudios más recientes en el tema utilizan mediciones de escáner láser o técnicas de análisis de imagen, por ejemplo, el Sistema de Imágenes de Agregado [13]. Sin embargo, debido a la alta correlación entre micro-textura y fricción a baja velocidad, las mediciones de fricción de ensayos a baja velocidad (como el BPT) son utilizadas como sustituto de la micro-textura.

Los avances tecnológicos han permitido la medición directa de la micro-textura utilizando láser de no-contacto como el *Circular Track Meter* (CTM) y el *Laser Texture Scanner* 9300 (LTS). La información recopilada puede ser utilizada para estimar algunas estadísticas del perfil como, por ejemplo, la profundidad media de perfil o *mean profile depth* (MPD) [14]. El MPD se estima dividiendo el perfil en segmentos de 100 mm, cada segmento se divide en mitades y se determina el punto más alto en cada mitad, el promedio de estos dos puntos se conoce como la altura media de segmento. El MPD corresponde al promedio de las alturas medias de segmento para todos los segmentos que conforman el perfil [14]. Por lo tanto, el MPD es una medida lineal, mientras que el MTD es volumétrico.

Por otro lado, el LTS es un equipo láser capaz de medir longitudes de onda hasta los 50 μm , incluyendo macro-textura y la primera década de la micro-textura ($50 < \lambda < 500 \mu\text{m}$). Este equipo es capaz de medir un área máxima de 100 por 75 mm. La mayor desventaja del LTS es que, a su mayor resolución, la medición toma aproximadamente dos horas para escanear el área máxima, por lo que resulta impráctica para mediciones de campo [3]. El LTS también fue poco confiable en el campo durante este estudio.

1.2.2 Caracterización de la textura

La caracterización de la textura está basada en el uso de parámetros. Para la descripción de la macro-textura existen parámetros bien establecidos y utilizados ampliamente, los más comunes son el MTD y el MPD, discutidos anteriormente. Sin embargo, a pesar de que son utilizados en muchas especificaciones e investigaciones, estos parámetros son muy simples y no dan una descripción de la distribución del perfil, lo cual es crítico para la evaluación de la fricción. Por ejemplo, superficies de pavimento que poseen el mismo MPD pueden presentar texturas muy diferentes. En el caso de la micro-textura, hasta ahora no existen parámetros estándar establecidos, sin embargo, muchos parámetros utilizados en macro-textura se han aplicado a la descripción de la micro-textura.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías ha sido posible una mejor descripción de la micro-textura, por lo que se han presentado una serie de métodos y procedimientos para caracterizarla. Recientemente se han utilizado diferentes tipos de parámetros espaciales y se ha incorporado el análisis espectral, que corresponde a una evaluación independiente de la escala de medición. Los parámetros son dependientes de la escala cuando se puede calcular el mismo parámetro a diferentes escalas, por ejemplo, obtener un MPD para la macro-textura y otro MPD para la micro-textura. Por otro lado, los parámetros espectrales son considerados independientes de la escala debido a que estima un solo parámetro multi-escalar, que incluye un rango amplio

de longitudes de onda en la textura, generalmente son utilizados para evitar lo complejo de definir los mismos parámetros para distintas escalas del material.

Los parámetros espaciales se pueden dividir en cuatro grupos: amplitud, espaciamento, híbridos y funcionales. Los parámetros de amplitud o de altura describen la distribución estadística de las alturas, mientras que los parámetros de espaciamento incluyen la periodicidad espacial de los datos. Los parámetros híbridos representan una descripción tanto del espaciamento como de la altura. Los parámetros funcionales presentan información sobre la superficie basados en la curva de la integral de la función de distribución de la altura, que brinda información sobre la probabilidad de que el perfil tenga cierta altura Z , en cualquier punto longitudinal Y o transversal X . La Tabla 1 presenta algunos de los parámetros más utilizados en la caracterización de la textura del pavimento.

Tabla 1. Parámetros de textura utilizados para la caracterización de la textura

Amplitud	
Profundidad media de perfil (MPD)	$MPD = \frac{1}{2} [\text{máx}(h_1, \dots, h_{N/2}) + \text{máx}(h_{N/2+1}, \dots, h_N)]$
Altura media (R_a)	$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i $
Altura máxima (R_z)	$R_z = \text{máx}(h_i) - \text{mín}(h_i), i = 1..N$
Media cuadrática (RMS)	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^2}$
Oblicuidad (R_{sk})	$R_{sk} = \frac{1}{RMS^3} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^3}$
Curtosis (R_{ku})	$R_{ku} = \frac{1}{RMS^4} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^4}$
Híbridos	
Varianza de pendiente de dos puntos (SV_{2pts})	$SV_{2pts} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{i+1} + h_i}{\Delta x} \right)^2}$
Varianza de pendiente de seis puntos (SV_{6pts})	$SV_{6pts} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{i+3} - 9h_{i+2} + 45h_{i+1} - 45h_{i-1} + 9h_{i-2} - h_{i-3}}{60 \cdot \Delta x} \right)^2}$

Donde, h_i = altura de la coordenada "i"; N = número de coordenada; Δx = distancia horizontal entre coordenadas.

La media cuadrática (RMS) es empleada cuando se requiere un valor más preciso para la descripción de la textura, ha sido ampliamente utilizada en investigaciones de textura de pavimento [2, 3, 15, 16], principalmente porque puede utilizarse junto con el MPD para determinar si la superficie posee una textura positiva o negativa, que no puede obtenerse utilizando únicamente el MPD o el MTD. Adicionalmente, los valores de oblicuidad (R_{sk}) y curtosis (R_{ku}) presentan una descripción de la superficie en términos de la distribución de las alturas. La oblicuidad representa el grado de simetría de las alturas del perfil con respecto a la altura media, el signo indica la predominancia de picos (positivo) o valles (negativo). Por otro lado, la curtosis indica la presencia de picos extremadamente altos o bajos (si es mayor que 3) o la ausencia de estos (si es menor que 3). Si el perfil presenta una distribución normal, la oblicuidad es 0 y la curtosis es 3.

Li et al. [2] y Serigos et al. [3] utilizaron dos parámetros híbridos para describir la textura del pavimento. El primer parámetro es la varianza de pendiente de dos puntos (SV_{2pts}) que mide la pendiente entre dos puntos como la diferencia en altura entre dos coordenadas consecutivas. El segundo parámetro es la varianza de pendiente de seis puntos (SV_{6pts}), que estima la pendiente utilizando una suma ponderada de los valores de altura de seis coordenadas consecutivas dividida entre la distancia horizontal entre ellas.

2 Escáner de Láser Linear

Un Escáner de Láser Linear (LLS) fue implementado por la Universidad de Texas en Austin para obtener una descripción mejorada de la textura de la superficie del pavimento. El LLS está

compuesto por una láser linear y un motor linear para controlar su movimiento horizontal (eje Y). Se implementó un marco metodológico para la recolección y el procesamiento de los datos para caracterizar tanto la macro- como la micro-textura.

El LLS captura información sobre la altura de hasta 800 perfiles en 15 segundos (ver Figura 1a), lo cual puede ser procesado y analizado posteriormente para obtener una descripción de la textura. Cada perfil horizontal posee hasta 15000 puntos. El eje transversal es independiente del tiempo debido a que los 800 puntos son captados instantáneamente, mientras el eje longitudinal es dependiente del tiempo ya que los puntos son capturados durante la duración de recolección de datos, que puede variar dependiendo de la frecuencia de muestreo seleccionada. Para este estudio, el análisis se basó únicamente en los perfiles longitudinales. La respetabilidad del LLS permite cubrir longitudes de onda que abarcan la macro-textura y la primera década de la micro-textura. Para separar los perfiles de macro- y micro-textura se utilizaron filtros lineares, específicamente el filtro *Butterworth*.

El LLS utiliza una tasa de muestreo de un punto cada 8 μm , que es mucho menor a la del CTM (870 μm) y del LTS (15 μm). Esto permite una muestra máxima de 15000 puntos para el LLS, 1024 para el CTM y 7212 para el LTS. El área máxima que puede escanear utilizando la configuración establecida es de 120 por 32.6 mm. La mayor ventaja que presenta el LLS es su resolución vertical de 0.5 μm , comparada con el CTM (3 μm) y el LTS (15 μm); además es muy eficiente ya que el tiempo de recolección de datos es de 15 segundos, mientras que el LTS puede durar hasta 2 horas en su máxima resolución.

La macro-textura fue estimada para segmentos de 100 mm de largo, mientras que para la micro-textura se utilizaron perfiles de 1.0 mm basado en resultados de investigaciones previas [3]. La descripción de la micro-textura fue aplicada únicamente al área activa, que fue definida como el área de interacción neumático-pavimento. Esta área activa es estimada como la porción superior a la media de la altura del perfil. Debido a que los perfiles están normalizados con respecto a la media, el área activa corresponde a las medidas positivas de la macro-textura. Los perfiles finales fueron caracterizados utilizando los parámetros mostrados en la Tabla 1. En el análisis se utilizó el valor de la mediana de los parámetros calculados para todos los segmentos obtenidos, ya que esta estadística no se ve tan afectada, como la media, en presencia de valores extremos. La Figura 1b muestra los perfiles finales de macro- y micro-textura.

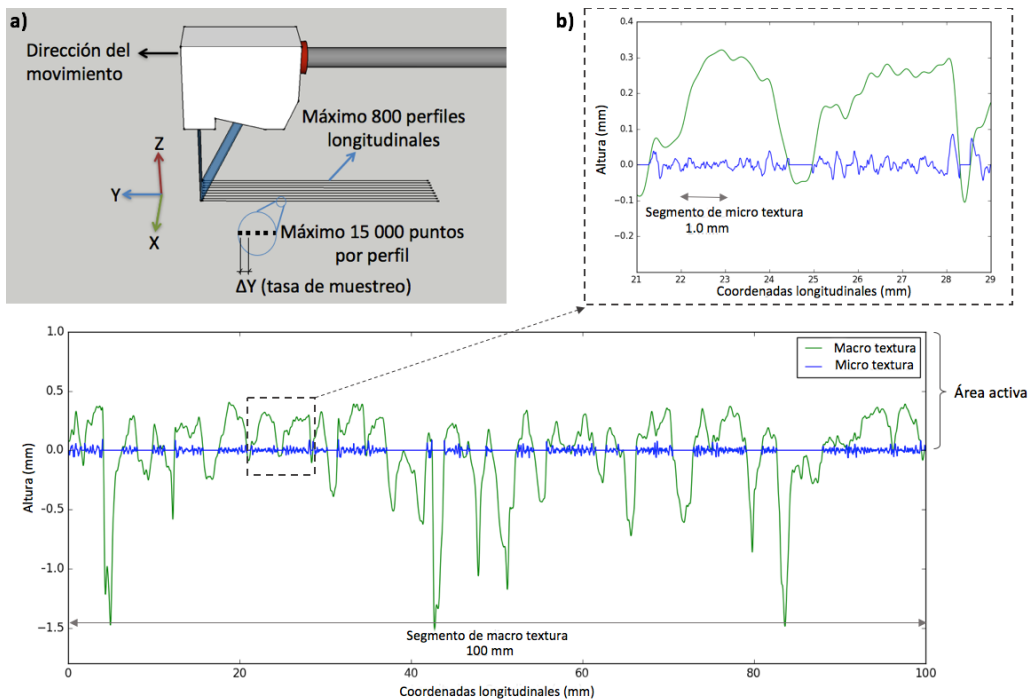


Figura 1 (a) Perfiles longitudinales del LLS y (b) perfiles finales de macro y micro-textura

3 Recolección de datos

Se recolectaron medidas de fricción y textura en múltiples superficies en uso en Texas, empleando diferentes métodos de ensayo. Para la caracterización de la fricción se utilizaron los ensayos del BPT, DFT y el micro-GripTester, mientras que para la textura se utilizaron el Círculo de Arena, el CTM y el LLS. Se seleccionaron secciones con un rango amplio de coeficientes de fricción y textura. La muestra total consta de 36 mediciones, que incluyen diferentes tipos de superficie: graduación densa tipo C (6 muestras), y tipo D (6 muestras), tipo F (2 muestras), mezcla porosa (PFC) (8 muestras), Novachip (2 muestras), matriz asfáltica con piedra (SMA) tipo C (2 muestras), *fog seal* (1 muestra) y aceras de concreto (7 muestras). La recolección de datos consistió en la toma de medidas en la trayectoria de la rueda derecha y en el centro del carril. Se midieron 3 diferentes replicas separadas por 15 m aproximadamente, y se estimó el promedio de las tres mediciones para cada sector ensayado.

3.1 Recolección de datos de fricción

Los resultados obtenidos del DFT pueden ser usados para representar la fricción en la superficie a diferentes velocidades, para este estudio se seleccionaron los DFTN en tres velocidades, 20 km/h (DFT20), 40 km/h (DFT40) y 60 km/h (DFT60). Estas medidas fueron estimadas utilizando el promedio de la velocidad seleccionada y un rango de ± 5 km/h, por ejemplo, para el DFT20 se promediaron los datos obtenidos de DFTN para las velocidades de 15 a 25 km/h. Esto permite un análisis más robusto e incrementa la confianza en los resultados obtenidos. Por otro lado, los resultados del micro-GripTester consisten en mediciones de fricción continuas a lo largo de la distancia medida, por lo que para este estudio se promediaron los GN obtenidos en cada sector muestreado a lo largo de la distancia de evaluación, establecida como 30 m, así se obtiene un solo valor de GN por cada muestra.

3.2 Recolección de datos de textura

Las medidas del LLS se obtuvieron en la misma área cubierta por el CTM, por lo que las mediciones se hicieron en orden, primero el CTM y seguidamente el LLS. El LLS se colocó en los sectores correspondientes a la dirección del tráfico, específicamente los sectores A y E del CTM, los resultados finales consistieron en un promedio de ambos sectores. Posteriormente, las medidas del LLS se procesaron y se separaron los perfiles correspondientes a la macro-textura y a la micro-textura y se estimaron los parámetros mostrados en la Tabla 1 para cada perfil por separado. Los resultados de macro-textura del MPD del CTM se compararon con los resultados del MPD del LLS a manera de validación de los resultados, se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) del 96%.

4 Modelos de fricción en función de la textura

La información sobre la fricción obtenida se modeló en función de los distintos parámetros de textura obtenidos utilizando el LLS, donde se consideraron varios parámetros para ambas, macro- y micro-textura.

Los resultados mostraron que, al obtener una regresión lineal simple (RLS), la relación entre fricción y textura era inversamente proporcional, lo cual contradice la base teórica, adicionalmente se encontraron valores de R^2 bajos (Figura 2a y 2c). Sin embargo, al segregar la información por tipo de superficie, los resultados del R^2 obtenidos fueron significativamente mejores, y se observó una relación directamente proporcional (Figura 2b y 2d). Esto sugiere que es necesaria la incorporación de una variable adicional al análisis, por lo que se propuso un análisis de datos de panel o datos longitudinales, que hace referencia a un análisis de datos multidimensionales que incluyen información de múltiples fenómenos. Este análisis incorpora el uso de regresiones lineales múltiples (RLM), que permita la inclusión de la información del

tipo de superficie en los modelos de fricción. Para el análisis reportado en este artículo, únicamente se utilizaron las superficies de mezcla asfáltica en caliente (MAC), se identificaron cinco grupos homogéneos:

- Tipo 1: mezcla porosa 2 y Novachip (PFC₂)
- Tipo 2: matriz asfáltica con piedra tipo C (SMA-C)
- Tipo 3: graduación densa tipo C (DG-C)
- Tipo 4: graduación densa tipos D y F (DG-D&F)
- Tipo 5: mezcla porosa 1 (PFC₁)

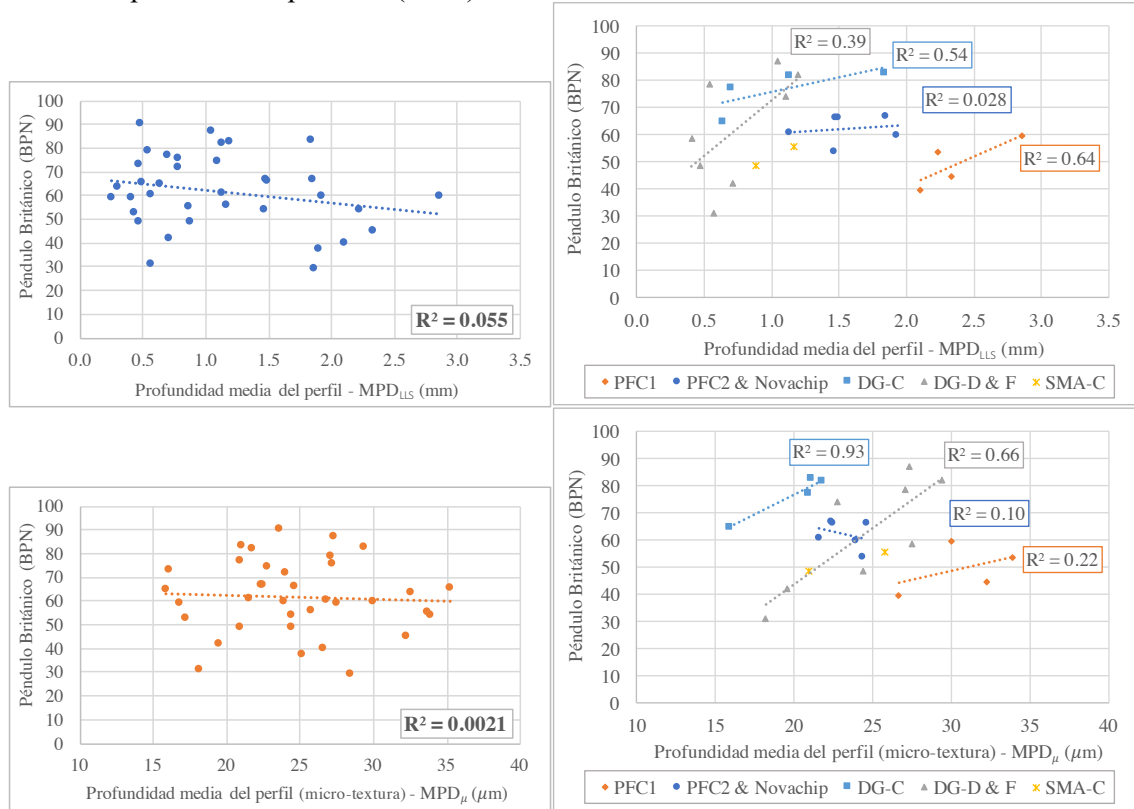


Figura 2 BPN en función del MPD (a) macro-textura RLS, (b) macro-textura RLM, (c) micro-textura RLS y (d) micro-textura RLM

4.1 Modelos

El análisis propuesto incluye el uso de RLM para modelar la fricción utilizando información de textura y tipo de superficie, en este caso MAC. Los tipos de mezcla son variables categóricas (o cualitativas), por lo que se incorporan en el modelo utilizando una variable indicativa que puede tener valores de 1 y 0. Las variables toman el valor 1 cuando la muestra pertenece al grupo de MAC propuesto y 0 si no pertenece.

Los modelos propuestos se presentan en las Ecuaciones 1, 2 y 3. Estos modelos se consideran de primer orden sin interacción, que corresponde a la generalización más directa de los modelos de RLS. La pendiente es constante para todos de los tipos MAC considerados, y los cinco grupos están representados como líneas paralelas. Sin embargo, es importante resaltar que la Figura 2b y 2d sugiere que las pendientes pueden ser diferentes, pero se consideró que esta simplificación es razonable.

El Modelo 1 considera únicamente la macro-textura y el tipo de MAC en las variables independientes (X). Por lo que el resultado del coeficiente β_{Macro} indica la influencia de la macro-textura en la medición de fricción obtenida, representada por la variable dependiente Y_{Fr} . Por otro lado, el Modelo 2 incluye únicamente información de la micro-textura y el tipo de

MAC, por lo que el coeficiente β_{Micro} representa la influencia de la micro-textura en la medición de fricción. El Modelo 3 incluye los valores de ambos macro- y micro-textura, además del tipo de MAC. En este caso, el modelo representa el efecto en la predicción de la fricción cuando se toma en cuenta ambos componentes de la textura. Los coeficientes de las variables ficticias ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4) indican la diferencia entre la fricción del tipo de MAC evaluada y la fricción del Tipo 5, cuando se utiliza un valor fijo de textura.

$$\text{Modelo 1: } Y_{Fr} = \beta_0 + \beta_{Macro}X_{Macro} + \beta_1X_{Tipo 1} + \beta_2X_{Tipo 2} + \beta_3X_{Tipo 3} + \beta_4X_{Tipo 4} \quad (1)$$

$$\text{Modelo 2: } Y_{Fr} = \beta_0 + \beta_{Micro}X_{Micro} + X_{Tipo 1} + \beta_2X_{Tipo 2} + \beta_3X_{Tipo 3} + \beta_4X_{Tipo 4} \quad (2)$$

$$\text{Modelo 3: } Y_{Fr} = \beta_0 + \beta_{Macro}X_{Macro} + \beta_{Micro}X_{Micro} + \beta_2X_{Tipo 1} + \beta_2X_{Tipo 2} + \beta_3X_{Tipo 3} + \beta_4X_{Tipo 4} \quad (3)$$

Los 3 modelos establecidos se utilizan empleando alguna de las 5 mediciones de fricción obtenidas (BPN, DFT20, DFT40, DFT60 y GN) y los valores obtenidos del LLS para los 8 parámetros en estudio, mostrados en la Tabla 1, para la macro-textura (X_{Macro}) y la micro-textura (X_{Micro}). En total se obtuvieron 120 modelos y se utilizó Microsoft Excel 2016 para realizar el análisis.

4.2 Análisis estadístico

Se utilizó una prueba de hipótesis de dos colas para determinar si las variables independientes incluidas en los modelos presentan una influencia estadísticamente significativa en la fricción. El nivel de confianza establecido es 95%, es decir, una significancia de $\alpha = 0.05$. La hipótesis nula (H_0), mostrada en la Ecuación 4, establece que el coeficiente β_i es igual a 0, lo que significa que la variable independiente correspondiente no presenta ningún impacto en la medición de fricción. La hipótesis alternativa (H_a) indica que el coeficiente β_i es distinto de 0 (Ecuación 5), por lo que la variable independiente correspondiente posee una influencia en la medición de fricción. Se necesita rechazar la hipótesis nula para poder concluir que los coeficientes son distintos de 0 y que las variables en estudio poseen una influencia estadísticamente significativa en la fricción, con un nivel de confianza del 95%.

$$H_0: \beta_i = 0 \quad (4)$$

$$H_a: \beta_i \neq 0 \quad (5)$$

Donde, i =Macro, Micro, Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Tipo 4

Para la prueba de hipótesis se analizaron los resultados del t-estadístico y el p-valor. Estos dos indicadores determinan si rechazar o no la hipótesis nula. El t-estadístico de un parámetro estimado es la razón de la desviación de su valor nocional y su desviación estándar. El p-valor (o significancia observada) representa la probabilidad de obtener un valor del t-estadístico al menos tan contradictorio a la hipótesis nula como el valor encontrado con la muestra disponible, asumiendo que la hipótesis nula es verdadera. El p-valor es utilizado para realizar la decisión final de rechazar o no la hipótesis nula, este valor se compara con el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) que representa la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera (error tipo I).

Los modelos de RLS utilizan el R^2 como medida de correlación entre los datos Y y X de los modelos, dado que mide cuán cercanos están los datos a la línea ajustada en la regresión. Sin embargo, el R^2 no es apropiado para comparar modelos de RLM porque su valor incrementa cada vez que se añade un predictor adicional al modelo. El coeficiente de determinación múltiple (R^2_{aju}) ajusta el R^2 con el número de predictores de los modelos, por lo tanto, este valor es más apropiado para comparar modelos con distinto número de variables independientes, este valor fue obtenido para los modelos del análisis realizado en el presente estudio.

La Tabla 2 presenta los resultados del t-estadístico y p-valor para los coeficientes de las principales variables de los Modelos 1, 2 y 3, utilizando los distintos parámetros de textura (separados en columnas). Los valores en celdas oscurecidas representan las condiciones para las que no se puede rechazar la hipótesis nula.

4.2.1 Profundidad media de perfil (MPD)

Los resultados para el parámetro MPD y la medida de fricción del BPT (BPN) muestra que para el Modelo 1 se rechaza la hipótesis nula de $\beta_{Macro,MPD} = 0$, lo que sugiere que la macro-textura presenta una influencia estadísticamente significativa en esta medición de fricción. Similarmente, en el Modelo 2 se rechaza la hipótesis $\beta_{Micro,MPD} = 0$, por lo que la micro-textura también posee una influencia significativa en esta medida de fricción. En el Modelo 3 también se rechazan las hipótesis nulas $\beta_{Macro,MPD} = 0$ y $\beta_{Micro,MPD} = 0$, lo que sugiere que ambos componentes de la textura influyen en la medición de fricción. Además, el R^2_{aju} obtenido es mayor en comparación con los Modelos 1 y 2, por lo que se observa que incluir ambas componentes de la textura en el modelo de fricción mejoró la predicción. Esta misma tendencia se presentó en los resultados del DFT (DFT20, DFT40 y DFT60). El mayor valor de R^2_{aju} encontrado en los modelos para el MPD es de 83%, correspondiente al modelo del DFT40.

Los resultados del MPD y la medida de fricción del micro-GripTester (GN) muestra que la hipótesis nula $\beta_{Macro,MPD} = 0$ no puede ser rechazada. Esto sugiere que la macro-textura no presenta ninguna influencia en los valores de GN. Sin embargo, para el Modelo 2 se encontró influencia de la micro-textura en la fricción. El Modelo 3 sugiere que la incorporación de la información de ambos componentes de textura no mejora la predicción de fricción, dado que el Modelo 3 presenta un valor de R^2_{aju} similar al del Modelo 2. Este resultado puede relacionarse a la velocidad del ensayo (2.5 km/h), debido a que la micro-textura tiene una mayor influencia en la fricción a bajas velocidades y la macro-textura a altas velocidades. Es posible que el ensayo no sea capaz de capturar la influencia de la macro-textura debido a la muy baja velocidad.

4.2.2 Comparación con otros parámetros de textura

El mismo análisis se aplicó a los otros siete parámetros en estudio, los resultados se presentan en la Tabla 2. En general, los resultados muestran que los parámetros de macro-textura que presentan una influencia estadísticamente significativa en las medidas de fricción (Modelo 1) del BPT y el DFT son: MPD, R_z , R_{sk} y R_{ku} ; y para el micro-GripTester únicamente R_{sk} y R_{ku} . Los parámetros de micro-textura que presentaron influencia en la fricción (Modelo 2) del BPT, el DFT y el micro-GripTester son: MPD, RMS, R_a , R_z , SV_{2pts} , and SV_{6pts} . Adicionalmente, se puede observar que únicamente el R_z capta el efecto de incorporar ambos componentes de la textura (Modelo 3) para las medidas del DFT a 40 y 60 km/h (alta velocidad). Cabe destacar que el R_z y el MPD se obtuvieron con una metodología similar. El R_z es la diferencia entre el punto más alto y el punto más bajo del segmento de 100 mm para macro-textura y 1.0 mm para micro-textura. Por otro lado, el MPD es el promedio del punto más alto obtenido en cada mitad de los segmentos. Por lo que es de esperar que estos dos parámetros presenten resultados similares. Sin embargo, el MPD parece ser el parámetro más adecuado para caracterizar la textura en los modelos de fricción.

4.3 Modelos finales

Los modelos más apropiados de fricción en función de textura y tipo de mezcal (MAC) se determinaron con base en los resultados de las pruebas de hipótesis, los resultados se muestran en la Tabla 3. La tabla muestra el valor de los coeficientes para cada variable independiente, así como el R^2_{aju} para cada modelo representando las cinco medidas de fricción en estudio.

Tabla 2. Modelos de fricción en función de la textura

Y _{Fr}	Modelo	MPD		RMS		R _a		R _z		R _k		R _{ku}		SV _{2pts}		SV _{5pts}		
		β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	β_{Macro}	β_{Micro}	
BPN	1	t-estád	2.53		1.56		1.76		2.39		3.30		-5.10		1.81		1.85	
		p-val	0.021		0.136		0.096		0.028		0.004		0.000		0.087		0.081	
		R ² _{aju}	0.357		0.232		0.255		0.338		0.456		0.643		0.262		0.267	
	2	t-estád		4.40		4.54		4.57		4.47		0.67		0.55		3.34		3.56
		p-val		0.000		0.000		0.000		0.000		0.514		0.591		0.004		0.002
		R ² _{aju}	0.579		0.593		0.596		0.587		0.149		0.142		0.578		0.488	
	3	t-estád	2.14	4.00	1.26	4.26	1.51	4.31	1.91	4.01	3.17	0.53	-4.89	-0.09	-0.07	2.51	0.17	2.72
		p-val	0.047	0.001	0.223	0.001	0.148	0.000	0.073	0.001	0.006	0.600	0.000	0.929	0.949	0.023	0.865	0.015
		R ² _{aju}	0.649		0.606		0.623		0.640		0.434		0.622		0.429		0.458	
GN	1	t-estád	1.68		0.69		0.81		1.59		3.02		-3.82		1.78		1.61	
		p-val	0.111		0.498		0.431		0.131		0.008		0.001		0.092		0.126	
		R ² _{aju}	0.339		0.250		0.257		0.329		0.498		0.586		0.350		0.331	
	2	t-estád		3.47		3.64		3.65		3.50		0.85		0.31		3.03		3.24
		p-val		0.003		0.002		0.002		0.003		0.408		0.763		0.008		0.005
		R ² _{aju}	0.549		0.567		0.567		0.552		0.260		0.233		0.499		0.524	
	3	t-estád	1.01	2.99	0.09	3.42	0.22	3.40	0.86	3.01	2.92	0.81	-3.72	-0.33	0.08	2.18	0.02	2.55
		p-val	0.326	0.009	0.933	0.004	0.829	0.004	0.403	0.008	0.010	0.427	0.002	0.742	0.940	0.045	0.983	0.022
		R ² _{aju}	0.549		0.540		0.542		0.545		0.488		0.682		0.468		0.494	
DFT20	1	t-estád	2.61		1.61		1.72		2.52		2.78		-3.32		2.60		2.61	
		p-val	0.018		0.126		0.103		0.022		0.012		0.004		0.018		0.018	
		R ² _{aju}	0.728		0.672		0.678		0.723		0.737		0.768		0.727		0.728	
	2	t-estád		3.48		3.50		3.56		3.42		0.79		0.48		3.51		3.46
		p-val		0.003		0.003		0.002		0.003		0.443		0.276		0.003		0.003
		R ² _{aju}	0.776		0.777		0.780		0.772		0.716		0.708		0.777		0.775	
	3	t-estád	3.03	2.14	1.28	3.23	1.40	3.28	2.00	2.93	2.66	0.67	-3.23	-0.26	0.77	2.13	1.06	2.22
		p-val	0.008	0.047	0.218	0.005	0.179	0.004	0.062	0.009	0.016	0.511	0.005	0.797	0.451	0.048	0.306	0.041
		R ² _{aju}	0.813		0.785		0.791		0.805		0.729		0.755		0.772		0.776	
DFT40	1	t-estád	2.89		1.78		1.89		2.75		2.79		-3.88		2.78		2.82	
		p-val	0.010		0.092		0.074		0.013		0.012		0.001		0.012		0.011	
		R ² _{aju}	0.682		0.604		0.696		0.671		0.675		0.746		0.673		0.677	
	2	t-estád		4.40		4.52		4.57		4.44		0.88		0.67		0.00		3.79
		p-val		0.000		0.000		0.000		0.000		0.392		0.514		0.837		0.001
		R ² _{aju}	0.775		0.782		0.784		0.778		0.553		0.545		0.736		0.741	
	3	t-estád	2.62	4.10	1.57	4.28	1.71	4.34	2.38	4.06	2.68	0.78	-3.67	0.18	0.88	2.24	1.18	2.43
		p-val	0.018	0.001	0.135	0.001	0.106	0.000	0.030	0.001	0.016	0.448	0.002	0.863	0.394	0.039	0.253	0.026
		R ² _{aju}	0.830		0.798		0.805		0.823		0.667		0.731		0.733		0.746	
DFT60	1	t-estád	2.80		1.71		1.84		2.63		2.78		-4.19		0.02		2.63	
		p-val	0.012		0.104		0.082		0.017		0.012		0.001		0.040		0.017	
		R ² _{aju}	0.613		0.523		0.533		0.599		0.612		0.719		0.586		0.599	
	2	t-estád		4.35		4.50		4.53		4.44		0.86		0.73		3.37		3.51
		p-val		0.000		0.000		0.000		0.000		0.399		0.477		0.003		0.002
		R ² _{aju}	0.729		0.739		0.741		0.735		0.467		0.461		0.660		0.671	
	3	t-estád	2.48	4.01	1.47	4.25	1.63	4.29	2.22	4.02	2.67	0.76	-3.97	0.23	0.70	2.07	1.06	2.25
		p-val	0.024	0.001	0.159	0.001	0.122	0.000	0.040	0.001	0.016	0.456	0.001	0.820	0.495	0.054	0.304	0.038
		R ² _{aju}	0.790		0.755		0.763		0.782		0.603		0.703		0.650		0.673	

Tabla 3. Modelos de fricción finales

Y _{Fricción}	Modelo	X _{Textura}	Parámetro: <i>profundidad media de perfil (MPD)</i> *						
			β_0	β_{Macro}	β_{Micro}	β_1	β_2	β_3	β_4
Péndulo Británico (BPN)	3	Coefficiente	-65.4	12.9	2.7	43.7	40.1	73.5	51.1
		R ² _{aju}	0.649						
Micro-GripTester (GN)	2	Coefficiente	-0.307		0.029	0.310	0.269	0.641	0.272
		R ² _{aju}	0.549						
DFT a 20 km/h (DFT20)	3	Coefficiente	-0.574	0.019	0.116	0.460	0.439	0.833	0.406
		R ² _{aju}	0.813						
DFT a 40 km/h (DFT40)	3	Coefficiente	-0.626	0.118	0.021	0.426	0.409	0.780	0.405
		R ² _{aju}	0.830						
DFT a 60 km/h (DFT26)	3	Coefficiente	-0.671	0.123	0.023	0.409	0.397	0.776	0.415
		R ² _{aju}	0.790						

Notes: * X_{Macro} = MPD_{LLS} (mm) and X_{Micro} = MPD_μ (μm)

5 Sumario y conclusiones

Durante esta investigación se estudió la caracterización de la textura del pavimento a nivel macro y micro, con el propósito de utilizar esta propiedad de la superficie para modelar y así poder predecir la fricción. Para esto, se desarrolló un equipo láser (LLS) capaz de capturar información de la macro-textura y la primera década de la micro-textura. Este equipo demostró ser más robusto, preciso y eficiente que los equipos existentes. La información recolectada fue procesada y analizada, los perfiles de la macro- y micro-textura se separaron utilizando filtros lineares y cada perfil se caracterizó por separado utilizando ocho parámetros distintos. Los perfiles de macro-textura se separaron en segmentos de 100 mm y los de micro-textura en segmentos de 1.0 mm tomando en cuenta únicamente aquellos segmentos ubicados en el área correspondiente a la interacción neumático-pavimento.

Se midieron un total de 36 superficies alrededor de Texas. Se realizaron mediciones de campo de fricción (BPT, DFT y micro-GripTester) y textura donde se incluyó un amplio rango de coeficientes de fricción y tipos de superficie. Para el análisis se propusieron tres distintos modelos de RLM que permiten observar la influencia de la macro-textura (Modelo 1), la micro-textura (Modelo 2) y el efecto en la predicción de la fricción cuando se incorporan ambos componentes de textura (Modelo 3). Un total de 120 modelos fueron analizados tomando en cuenta las cinco mediciones de fricción (BPN, DFT20, DFT40, DFT60 y GN), los ocho distintos parámetros de textura obtenidos tanto para la macro- como para la micro-textura y el tipo de superficie. Las principales conclusiones se resumen a continuación

- No existe una única relación entre fricción y textura, la relación entre ambas propiedades es importante, pero varía de un tipo de superficie a otra. Por lo tanto, es importante incluir información sobre el tipo de superficie al modelar la fricción.
- En este estudio, el parámetro más apropiado para caracterizar la textura utilizada en los modelos de fricción fue la profundidad media del perfil (MPD).
- El análisis de la fricción del BPT mostró que los modelos se vieron afectados por ambos componentes macro- y micro-textura.
- Los modelos de fricción obtenidos con el DFT a 20, 40 y 60 km/h se vieron afectados tanto por la macro-textura como por la micro-textura. Además, se observó que el DFTN no necesariamente decrece con la velocidad.
- Los modelos de fricción utilizando las medidas del micro-GripTester fueron afectados significativamente por la micro-textura, pero no por la macro-textura.
- Los modelos de fricción utilizando el BPT y el DFT mostraron una mayor correlación (R^2_{aju}) utilizando únicamente la micro-textura, en comparación con los modelos que utilizaron únicamente la macro-textura.
- La predicción de la fricción del BPT y el DFT mejoró significativamente cuando se incorporaron las medidas de ambos componentes de la textura: macro y micro. Por lo tanto, la conclusión y recomendación más importante de este estudio es que en los modelos de predicción de fricción es necesaria la incorporación de la micro-textura. Además, no hay modelos generales sino que cada tipo de superficie tiene una relación específica entre fricción y textura.

6 Referencias

- [1] Rajaei, S., Chatti, K., and Dargazany, R. (2017). A review: Pavement Surface Micro-texture and its contribution to Surface Friction. Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Paper 17-06773.
- [2] Li, S., Noureldin, S., and Zhu, K. (2010). Safety Enhancement of the INDOT Network Pavement Friction Testing Program: Macrotecture and Microtexture Testing Using Laser Sensors. Joint Transportation Research Program FHWA/IN/JTRP-2010/25. Purdue University. West Lafayette, Indiana.
- [3] Serigos, P.A., Smit, A., and Prozzi, J. A. (2014). Incorporating Surface Micro-texture in the Prediction of Skid Resistance of Flexible Pavements. In Transportation Research Record: Journal of the

- Transportation Research Board, No. 2457, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 105–113.
- [4] Hall, J.W., K.L. Smith, J.C. Wambold, T.J. Yager and Z. Rado (2009). Guide for Pavement Friction. NCHRP Web-Only Document 108. National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). AASHTO Guide for Pavement Friction, first ed., Washington DC.
- [6] Kogbara, R.B., Masad E.A., Kassem, E. Sparpas A.T. Anupam, K. (2016). A state of art review of parameters influencing measurements and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials* 114 602–617.
- [7] ASTM E303 (1998). Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [8] ASTM E1911 (2009). Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [9] Henry, J.J. (2000). Evaluation of Pavement Friction Characteristics. NCHRP Synthesis 291. National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- [10] ASTM E 274 (2015). Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [11] Thomas, L. (2008) Grip Tester MK2 D-Type Maintenance Manual. Findaly, Irvine Limited. Midlothian, Scotland.
- [12] ASTM E965 (2006). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [13] Masad, E. (2005). Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications. Texas: Texas Transportation Institute. FHWA/TX-05/5-1707-01-1.
- [14] ASTM E1845 (2009). Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [15] Madeiros, M.S., Underwood, B.S., Catorena, C., Rupnow, T. Rowls, M. (2016) 3D Measurement of Pavement Macrotexture Using Digital Stereoscopic Vision. Transportation Research Board 95th Annual Meeting, Paper 16-5504.
- [16] Gunaratne, M. Bandara, J. Mendzorian, J. Chawla, M., and Ulrich, P. (2000). Correlation of Tire Wear and Friction to Texture of Concrete Pavements. *J. Mater. Civ. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:1(46), 46-54.