

## CALIBRACIÓN INICIAL DE UN MODELO DE ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL PARA LOS CORREDORES VIALES DE MAYOR TRÁNSITO EN COSTA RICA

Mayra Morales<sup>1</sup>, Luis Loría<sup>2</sup>, José Aguiar<sup>3</sup>, Roy Barrantes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>LanammeUCR, Universidad de Costa Rica; San José, Costa Rica; mmoralesa6@gmail.com

<sup>2</sup>LanammeUCR, Universidad de Costa Rica; San Pedro, Costa Rica; luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

<sup>3</sup>LanammeUCR, Universidad de Costa Rica; San Pedro, Costa Rica; jose.aguiar@ucr.ac.cr

<sup>4</sup>LanammeUCR, Universidad de Costa Rica; San Pedro, Costa Rica; roy.barrantes@ucr.ac.cr

### Resumen

El Índice de Fricción Internacional (IFI) integra mediciones de macrotextura y microtextura del pavimento para caracterizar su resistencia al deslizamiento. Actualmente en Costa Rica, es grado de deslizamiento de un pavimento es clasificado según la microtextura únicamente; el IFI facilita la integración del parámetro de macrotextura y describe la condición real del pavimento. Según experiencias internacionales recientes, los coeficientes de los parámetros del IFI deben ser revisados antes de implementarse. Calibrar un modelo de IFI permite la integración a una escala internacional que permita la transferencia de conocimientos y experiencias con otros países.

En este trabajo se establecen las primeras bases para la aplicación del IFI como normativa nacional para el diseño y evaluación de pavimentos. Se realizaron mediciones de macrotextura y microtextura en cinco rutas nacionales: Bernardo Soto, Braulio Carrillo, Florencio del Castillo, José María Castro Madriz y General Cañas. Las mediciones se realizaron con equipos del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Para mediciones de microtextura se utilizaron el Péndulo de Fricción, Griptester y Micro-Griptester; para las de macrotextura la Mancha de arena y el Láser de macrotextura. Se revisaron los coeficientes recomendados por la Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR) en 1995 para cada equipo con excepción del Micro-Griptester que no participó en el experimento internacional de la AIPCR [1]. Posteriormente, se calibró un modelo de IFI para mediciones de Griptester y Láser de macrotextura tomando como referencia las mediciones de Péndulo de Fricción y Mancha de arena; los coeficientes generados fueron comparados según experiencias internacionales y recomendaciones por la AIPCR. El Micro-Griptester fue calibrado y se obtuvieron coeficientes para obtener el parámetro de fricción del IFI. Finalmente se propusieron niveles de intervención e investigación para diferentes categorías de sitio y velocidades permitidas según los modelos calibrados en este trabajo.

### Palabras claves

Macrotextura, microtextura, fricción, niveles de investigación, niveles de intervención.

## 1 Introducción

El Índice de Fricción Internacional (IFI) es una escala de referencia que integra la textura y la fricción lateral, con el fin de tener una idea sobre la capacidad de un pavimento para ofrecer una superficie segura en condiciones adversas. Mediante este índice se obtiene homogeneidad en las mediciones con diferentes equipos y en cualquier pavimento del mundo, de forma que las características pueden ser comparadas mediante una escala común de fricción.

Actualmente en Costa Rica no se cuenta con un modelo de IFI que permita el diseño, evaluación y mantenimiento adecuado de las carreteras. Es por esto que es necesario el desarrollo de especificaciones técnicas con respecto a la fricción, que permitan obtener los parámetros principales para prevenir los accidentes por deslizamientos.

Los métodos y sistemas usados a través del mundo para medición de textura y resistencia al deslizamiento varían significativamente; por esta razón el Comité Técnico de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (AIPCR) en Caracterización Superficial decidió emprender un experimento internacional para comparar y armonizar mediciones de textura y resistencia al deslizamiento, que dio como resultado lo que se conoce como el Índice de Fricción Internacional (AIPCR, 1995).

A partir del experimento internacional de la AIPCR se obtuvo constantes para los diferentes equipos utilizados en mediciones de macrotextura y microtextura. Mediante resultados de trabajos de investigación recientes, se ha determinado una variación importante entre los valores de IFI calculados mediante los coeficientes de la AIPCR y los calibrados mediante mediciones de tramos de prueba a partir de diferentes equipos [2]. Debido a esta variación, se recomienda realizar un ajuste de estos valores antes de que las administraciones de carreteras puedan utilizarlo.

Para obtener valores representativos de IFI para las vías costarricenses es necesaria la calibración de los coeficientes de fricción y macrotextura para los equipos de medición disponibles. Actualmente, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) cuenta con el Griptester y el Láser de macrotextura para las mediciones dinámicas de fricción y macrotextura respectivamente. La armonización de estos valores es de gran importancia para el estudio y mantenimiento de las vías, ya que a partir de estos valores se podrá evaluar la condición de las carreteras de acuerdo a normas y experiencias internacionales.

## 2 Variables asociadas al modelo de Índice de Fricción Internacional

### 2.1 Textura

La textura del pavimento es definida como las asperezas presentes en la superficie. Estas asperezas son medidas como la desviación de la superficie en comparación con una superficie verdaderamente plana [3]. Las desviaciones existentes pueden definirse según la longitud de onda y la amplitud de las asperezas de los agregados.

La microtextura y la macrotextura son los factores predominantes en la fricción del pavimento, en la Figura 1 se muestran estos conceptos. La microtextura es significativa a bajas velocidades y causa adhesión entre la llanta y la superficie del pavimento; la macrotextura es la responsable fricción, histéresis y del hidropneumático [3].

La macrotextura, proporciona las propiedades necesarias para el escurrimiento del agua en el pavimento, de modo tal que la película de agua que sirve de fase entre el neumático y el pavimento mantenga cierto espesor que permita el contacto entre neumático y pavimento. Corresponde a la longitud de onda media ( $0.5 \text{ mm} < l < 50 \text{ mm}$ ); la amplitud de las asperezas de los agregados va desde 0.1 a 2.0 mm. Afecta la capacidad de frenado en presencia de agua y las emisiones de ruido en la interface rueda/pavimento.

La microtextura proporciona el contacto directo entre el neumático y el pavimento, y por tanto está directamente asociada a la resistencia al deslizamiento. Corresponde a la longitud de onda menor ( $l < 0.5$  mm) y la amplitud de las asperezas de los agregados varía desde 1 a 500 mm. Depende exclusivamente de las características del agregado y de su susceptibilidad al desgaste producido por el contacto con el neumático.

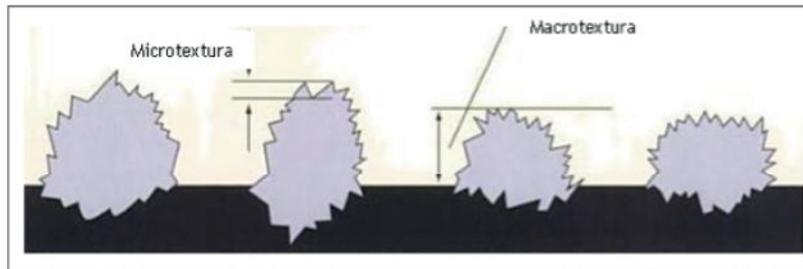


Figura 1 Concepto de microtextura y macrotextura  
Fuente: Whiteoak y Read, 2003

## 2.2 Fricción

La fricción en la superficie del pavimento es un factor de seguridad significativo que juega un papel crítico reduciendo los accidentes en pavimento húmedo. La fricción varía a lo largo de la vida útil o de diseño de un pavimento. Las fuerzas de fricción consisten mayormente en dos componentes denominadas adhesión e histéresis. Estas dos componentes pueden observarse en la Figura 2.

La adhesión es la fuerza cortante desarrollada en el área de contacto entre la llanta y el pavimento en dirección contraria al movimiento [4]. Esta fuerza de fricción es contribuida por la microtextura (rugosidad de la superficie). Según Hogervost (1974), a velocidades típicas de conducción, la adhesión aporta dos tercios de la resistencia desarrollada en la interface llanta-pavimento. Sobre superficies secas y limpias este rozamiento es muy alto pero disminuye en presencia de sustancias que impiden un contacto molecular perfecto (polvo, barro, láminas de agua entre otras).

La histéresis es producida a consecuencia de las irregularidades de la superficie del pavimento que hacen que el caucho de los neumáticos se comprima y dilate alternativamente. El caucho de los neumáticos almacena energía cuando la llanta se comprime sobre el pavimento, cuando la llanta se relaja parte de esta energía es recuperada por lo que se generan pérdidas de energía debidas a la histéresis elástica del material [5]. Esta fuerza depende mayormente de la macrotextura del pavimento ya que la llanta forma una superficie envolvente en la interface llanta-pavimento. Esta fuerza de rozamiento es generalmente más pequeña que la generada por la adherencia, sin embargo no se modifica al existir capas líquidas ya que las deformaciones que sufrirá el caucho serán las mismas que si no existieran dichas capas. Su aportación es determinante en casos de adherencia disminuida, en los que se convierte en el factor preponderante.

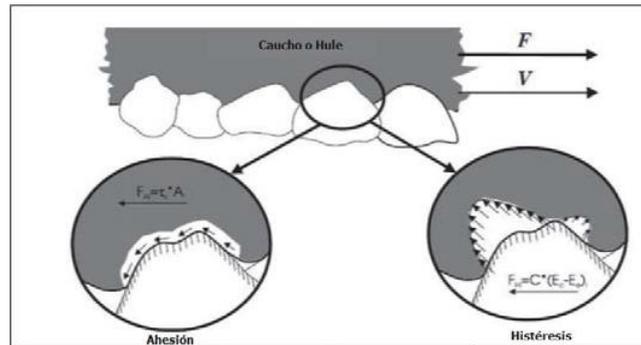


Figura 2 Adhesión e histéresis entre la llanta y el pavimento  
Fuente: Hall et al., 2009

### 2.3 Curva de fricción efectiva

En el proceso de frenado se conoce como velocidad de deslizamiento a la velocidad relativa entre la llanta y la superficie del pavimento, es decir la diferencia entre la velocidad del vehículo y la velocidad de la llanta. Cuando la llanta está rodando libremente la velocidad de deslizamiento es igual a 0; por otro lado cuando la llanta está totalmente bloqueada, la velocidad de deslizamiento es igual a la velocidad del vehículo.

En la Figura 3 se muestra la variación del coeficiente de fricción (resistencia al deslizamiento efectiva) con respecto a la velocidad de deslizamiento. Se observa que la fricción no es constante, y como después de un pico de fricción disminuye conforme se aumenta la velocidad de deslizamiento. Esta Figura refleja la razón por la que el uso de un número de fricción no refleja el comportamiento real de un pavimento.

Para velocidades de deslizamiento menores a la velocidad crítica, la llanta tiene la mayor influencia en el ascenso de la fricción hasta su pico [6]. La superficie del pavimento se convierte en la influencia predominante de la curva luego del punto de fricción máxima; donde la fricción disminuye conforme aumenta la velocidad, ya que disminuye el área de contacto entre la llanta y el pavimento.

Históricamente la fricción del pavimento ha sido medida y reportada por un solo número; aún cuando el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) ha señalado que mediante investigaciones se ha concluido que un índice de un único número para la evaluación de las características de fricción del pavimento puede ser erróneo [7]. La necesidad de un índice de fricción con más de un factor se debe a la interacción entre el pavimento y la rueda durante el proceso de fricción explicado anteriormente. La fricción real puede obtenerse únicamente mediante equipos que incorporen mediciones tanto de microtextura como de macrotextura del pavimento.

Lamentablemente la práctica actual en Costa Rica y en diferentes autoridades de carreteras internacionales es utilizar un número de fricción en sus especificaciones; comúnmente la macrotextura no es tomada en cuenta y se reporta únicamente el valor de microtextura y la velocidad a la que la medición fue tomada. El IFI representa la corrección de esta práctica ya que es un índice que reporta los dos componentes de la resistencia al deslizamiento efectiva, es decir incorpora las dos mediciones de textura relevantes durante el proceso de frenado tanto en una superficie seca como en una húmeda (Número de fricción y constante de velocidad).

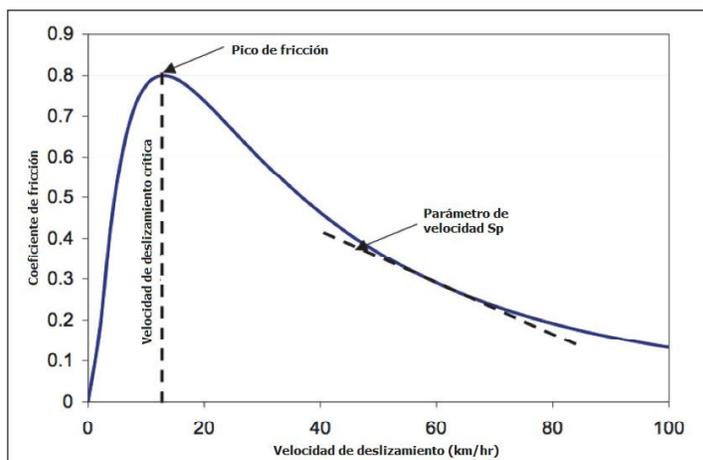


Figura 3 Curva típica de fricción  
Fuente: Yeaman, 2005.

### 3 Índice de Fricción Internacional

El IFI es un parámetro reciente que se presentó en el Congreso Mundial de la AIPCR celebrado en Montreal en septiembre de 1995, con relación al Índice de Regularidad Internacional (IRI) propuesto en 1986 por el Banco Mundial y ampliamente utilizado actualmente.

El IFI es un método basado en propiedades de textura en conjunto con pruebas de fricción para normalizar las mediciones realizadas por diferentes tipos de equipos. Fue desarrollado para proveer una comparación estándar de la fricción del pavimento alrededor del mundo [8]. Por definición la pareja de valores (F60, Sp) se designa como el IFI de un pavimento.

El modelo de AIPCR descrito es la base de la definición del IFI a través de los parámetros F60 y Sp. El primer valor representa la fricción de un pavimento en condiciones húmedas a 60 km/h y el segundo la constante de velocidad de la fricción de un pavimento húmedo. Con mediciones de macrotextura y fricción, es posible obtener el valor de IFI de acuerdo a la norma ASTM E 1960 "Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface".

#### 3.1 Determinación del parámetro Sp

En el primer intento de relacionar las medidas de equipos diferentes, se realizaron correlaciones lineales entre cada uno y todos los demás. El parámetro Sp representa la influencia de la velocidad en la curva de referencia (Golden Curve), por lo tanto mediante mediciones de fricción a diferentes velocidades y de macrotextura se determinó que este parámetro está ligado a la macrotextura.

Durante el experimento de la AIPCR se comprobó que la constante de velocidad Sp puede ser determinada mediante una regresión lineal en función de la medida de la macrotextura (Tx) en términos de Mean Profile Depth (MPD) en unidades de mm:

$$Sp = a + (b \cdot Tx) \quad (1)$$

Donde los valores de las constantes a y b varían de acuerdo al equipo utilizado para la medición de la macrotextura.

### 3.2 Determinación del parámetro F60

Para la estimación de F60 se establece el tipo de equipo a emplear y se realiza la medición de la fricción FRS en una sección de un pavimento dado. Se determina la velocidad S que depende del tipo de la rueda de medición y de la velocidad V del vehículo de arrastre.

El valor de la constante FR60 se determina mediante el valor de la fricción FRS obtenido en campo a partir del equipo de fricción utilizado a la velocidad de desplazamiento S por medio de la Ecuación 2. El valor de la velocidad de deslizamiento se obtiene multiplicando la velocidad de medición por el porcentaje de bloqueo del equipo de microtextura

$$FR60 = FRS \cdot e^{\frac{S-60}{SP}} \quad (2)$$

Finalmente se obtiene el valor buscado de F60 a través de la siguiente correlación con FR60 establecida por el experimento AIPCR (1995),

$$F60 = A + (B \cdot FR60) + C \cdot T_x \quad (3)$$

Donde A, B y C son constantes que varían de acuerdo al equipo utilizado para medir la fricción, el valor de C se utiliza únicamente cuando el neumático es estriado.

### 3.3 Equipos de medición macrotextura

#### 3.3.1 Mancha de arena

El método de la mancha de arena, método ASTM E-965 (ASTM 2006), es un procedimiento que consiste en la aplicación cuidadosa de un volumen conocido de material sobre la superficie, y el posterior cálculo de la profundidad de textura a partir de la medición del diámetro promedio formado por la mancha de material esparcido [9]. La arena utilizada tiene una granulometría específica; el método proporciona un valor que se conoce como profundidad de textura media (MTD, por sus siglas en inglés), el cual es considerado independiente de las características de la microtextura del pavimento. La expresión con la que se calcula el MTD es volumen dividido por área de la mancha.

#### 3.3.2 Láser de macrotextura

Las mediciones de macrotextura fueron realizadas mediante el láser de 64 kHz Selcom ubicado en la huella derecha del perfilómetro de superficie. El método proporciona un valor que se conoce como profundidad de perfil media (MPD, por sus siglas en inglés).

### 3.4 Equipos de medición de microtextura

#### 3.4.1 Péndulo de fricción británico

Las mediciones están normalizadas según ASTM E-303. Para efectuar la medida se ajusta de modo que el patín de goma, fijado en el péndulo, recorra una distancia normalizada en la superficie a medir. El péndulo se balancea desde la vertical hasta el reposo. La pérdida de energía del péndulo debido a la fricción del pavimento se registra en una escala graduada. La medición entrega como resultado el valor BPN (British Pendulum Number). La medición se da a una velocidad de 10 km/h.

### 3.4.2 Griptester

El sistema consiste en un equipo de deslizamiento fijo donde el neumático de prueba está conectada al eje de rueda del remolque por una cadena, permitiendo medir la resistencia a la rotación de un neumático liso con deslizamiento constante a un 14.5%. Las pruebas de fricción para mantenimiento tienen como objetivo medir la fricción de una superficie en condiciones estándar, y en ellas hay que humedecer dicha superficie de forma controlada. Estas pruebas son una parte necesaria de cualquier sistema de administración de pavimentos y están estandarizadas por la norma ASTM E 1844 y la norma británica BS 7941-2:2000.

### 3.4.3 Micro-Griptester

El Micro-Griptester fue desarrollado por la empresa Findlay Irvine, con el fin de medir la resistencia al deslizamiento de cualquier tipo de pavimento, ya sean señales horizontales, zonas peatonales entre otras, a un ritmo caminable. Está basado en el mismo principio de medición del Griptester con un 14.5% de deslizamiento (Findlay Irvine, 2012). Puede ser empujado con las manos, y está equipado con sensores de medida de esfuerzo, arrastre y carga, es una sola llanta de  $258 \pm 2$  mm de diámetro que se desliza a un 14.5% de la velocidad del equipo como se mencionó anteriormente. Las mediciones deben realizarse cuando la superficie esté seca, con una película de agua normalmente de 0.25 mm debajo de la llanta de prueba.

## 4 Definición del modelo de Índice de Fricción Internacional

### 4.1 Mediciones

Con el objetivo de obtener tramos de comportamiento homogéneo dentro de las rutas nacionales se realizó una tramificación homogénea por el método de las “diferencias acumuladas” descrito en el Apéndice J del método AASHTO 1993 a partir de mediciones de fricción (Grip Number) cada 5 metros facilitadas por el LanammeUCR.

Luego de obtener los tramos homogéneos para cada corredor, se obtuvieron las siguientes variables estadísticas para seleccionar los tres cercanos al valor máximo, medio y mínimo de GN con mejor comportamiento estadístico; de forma que se tenga variedad de textura y fricción para la calibración del modelo de IFI. Por cada corredor de estudio se seleccionaron tres tramos de 100 metros, por lo que se logró medir en 15 tramos diferentes a lo largo de Costa Rica.

En la Tabla 1 se puede observar las distancias entre mediciones y la velocidad a la que fueron tomadas. Las mediciones mediante el Griptester fueron realizadas a cuatro velocidades; esto con el fin de analizar la relación entre la velocidad de medición y los valores de Griptester así como para tener mayor cantidad de datos para la calibración del modelo de IFI.

Tabla 1 Distancia entre mediciones para cada equipo y velocidad de medición

| Equipo              | Distancia entre mediciones | Velocidad de medición  |
|---------------------|----------------------------|------------------------|
| Mancha de arena     | 20 m                       | 0                      |
| Péndulo de fricción | 20 m                       | 10 km/h                |
| Láser               | 10 m                       | 60 km/h                |
| Griptester          | 5 m                        | 10 - 30 - 50 y 70 km/h |
| Micro-Griptester    | 5 cm                       | 3.6 km/h               |

En la Figura 4 se observa el modelo de medición realizado en campo; como se mencionó anteriormente se midió en la huella derecha del vehículo. Los puntos negros indican las mediciones mediante equipo estático (Péndulo de fricción y Mancha de arena) separados como se observa a cada 20 m. Las mediciones de Láser, Griptester y Micro-Griptester (cada 10 m, 5 m y 5 cm respectivamente) fueron promediadas de la forma que indican los colores para poder asociarlos a cada medición puntual.

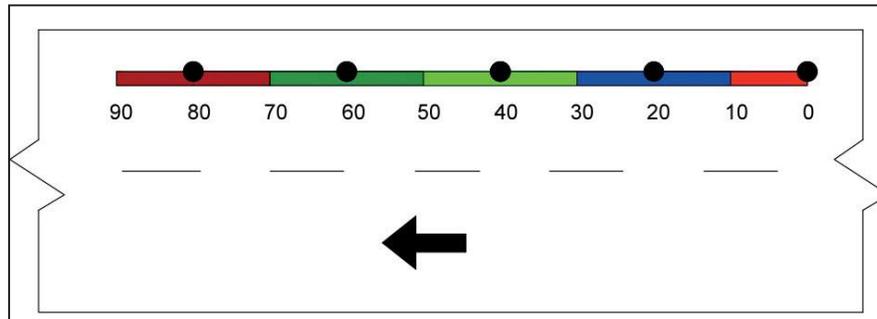


Figura 4 Metodología y homologación de mediciones estáticas y dinámicas

#### 4.2 Revisión de coeficientes recomendados por la AIPCR

Según la norma ASTM E960 deben seleccionarse al menos 10 pavimentos con un rango de mediciones de macrotextura y microtextura. Los tramos fueron seleccionados de acuerdo a mediciones de microtextura únicamente. Los rangos de macrotextura variaron desde 0,29 a 1,24 en términos de MTD (medida de la mancha de arena) en los 15 tramos.

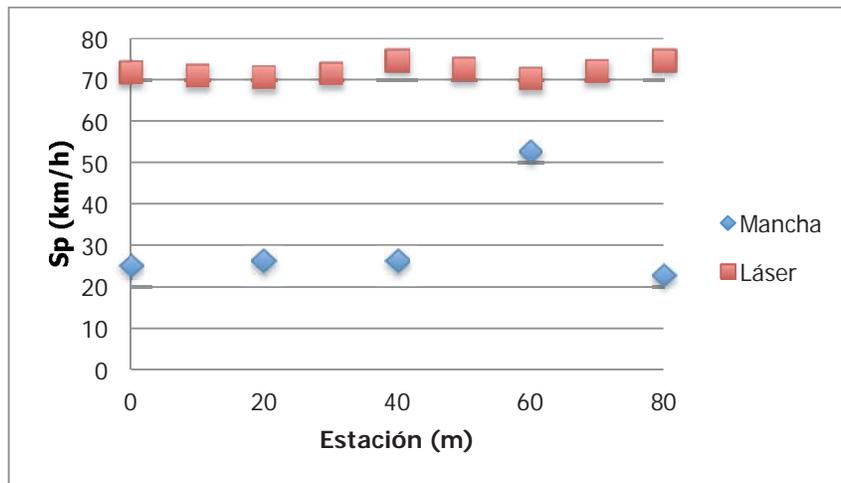


Figura 5 Valores de  $S_p$  para el tramo 1 de la Bernardo Soto según la AIPCR

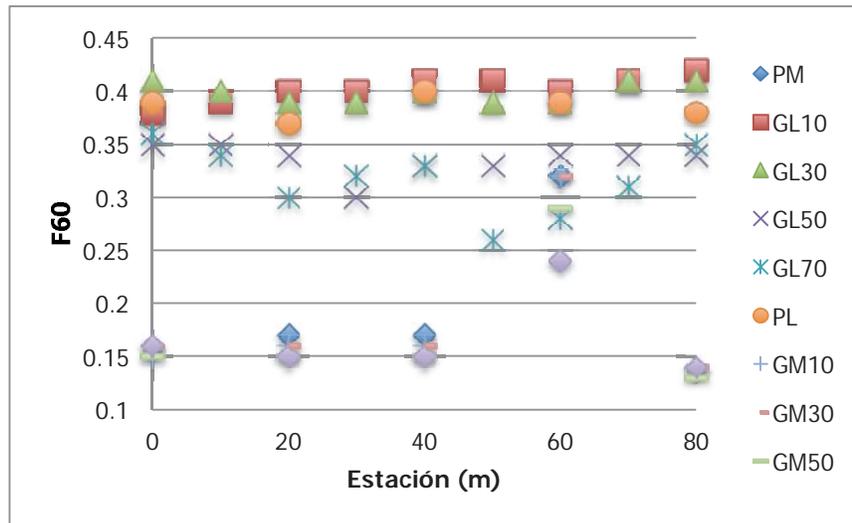


Figura 6 Valores de F60 para el tramo 1 de la Bernardo Soto según la AIPCR

Con el fin de comparar los resultados de IFI obtenidos a partir de los coeficientes que recomienda la AIPCR, se calculó un  $S_p$  y F60 para cada punto de medición mediante todas las combinaciones de equipo posibles. Como el IFI es un parámetro que pretende unificar las mediciones, se esperaba que los valores de  $S_p$  y F60 para un mismo punto fuera los mismos.

Las variaciones del parámetro de velocidad son significativamente altas pues el valor de  $S_p$  según el Láser de macrotextura es un 280% del valor determinado por la Mancha de arena para el tramo mostrado (Figura 5). En las mediciones con Griptester se observa la tendencia a disminuir del F60 conforme aumenta la velocidad. Es de esperarse que la fricción disminuya conforme aumenta la velocidad sin embargo, teóricamente el F60 por ser uno de los términos homogenizados del IFI no debería variar. En la Figura 6 puede observarse que aun utilizando la misma combinación de equipos y variando únicamente la velocidad el valor de F60 varía, por lo tanto se concluye que los coeficientes de la AIPCR deben ser revisados.

#### 4.3 Selección de equipos de referencia

Una vez con valores de IFI para todas las combinaciones de equipos de medición en los 15 tramos medidos, se analizó la homogeneidad de los datos a través del Software Estadístico Minitab 16. Se creó un diagrama de cajas para la variable  $S_p$  y F60 de cada tramo y para cada combinación de equipos; esto con el objetivo de identificar y eliminar los valores extremos. Una vez con los valores extremos eliminados, se analizaron los datos de los 15 tramos conjuntamente. Para el análisis de los datos de los cinco corredores en estudio se utilizó la técnica del Análisis de la Varianza multifactorial entre grupos (Modelo Lineal General).

Con el objetivo de obtener la pareja de equipos a utilizar como referencia nacional se valoró la capacidad de predecir los factores F60 y  $S_p$  para cada pareja de equipos. Se realizaron las cuatro combinaciones siguientes: Péndulo de fricción y Mancha de arena como reales, Péndulo de fricción y Láser de macrotextura como reales, Griptester y Mancha de arena como reales, y Griptester y Láser de macrotextura como reales. Una vez teniendo los dos parámetros del IFI reales para cada punto de medición se realizaron las regresiones lineales según la metodología propuesta por la

AIPCR con ayuda del Software Estadístico Minitab 16 para los equipos tomados como no reales.

Con respecto al equipo de macrotextura, se determinó que la mancha de arena genera un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj.) mayor al predecir los coeficientes que el Láser de macrotextura ( $R^2$  adj= 55.9%). Además, cuando se utiliza el Láser de macrotextura como predictor se puede ver que los datos de F60 adquieren mayor dispersión que al utilizar la Mancha de arena. Por lo tanto, el equipo de macrotextura tomado como referencia para el modelo es el de la Mancha de arena.

Por otro lado para el caso del equipo de microtextura los coeficientes de determinación ajustados son prácticamente iguales teniendo el Péndulo de Fricción y el Griptester como predictores (84.5% y 84.8% respectivamente). Por ser la diferencia pequeña, no se tomó en cuenta la dimensión del coeficiente de determinación, sino que se seleccionó el Péndulo de Fricción como predictor debido que realiza una medición estática al igual que la Mancha de arena.

#### 4.4 Calibración del modelo de IFI

##### 4.4.1 Constante de velocidad $S_p$

La constante de velocidad  $S_p$  se calibró suponiendo un comportamiento lineal, tal y como indica la AIPCR y un comportamiento exponencial como consecuencia de las experiencias en Virginia Tech en el 2009. Las Ecuaciones 4 y 5 describen los modelos generados.

$$S_p = a + b * T_x \quad (4)$$

$$S_p = a * T_x^b \quad (5)$$

El modelo que brindó mejores resultados fue el lineal como se puede observar en la Tabla 2. El coeficiente de determinación del modelo es bajo, investigaciones recientes recomiendan la obtención de los coeficientes del parámetro  $S_p$  tomando en cuenta también el equipo de microtextura. Sin embargo, en este trabajo se utilizó únicamente la metodología propuesta por la AIPCR, es decir, se asumió total dependencia del parámetro  $S_p$  de la macrotextura.

Tabla 2 Coeficientes para el Láser de macrotextura para los modelos calibrados

| <b>Modelo lineal calibrado (55.9%)</b>    |        |                       |       |
|---|--------|-----------------------|-------|
| a   | -20.61 | Error estándar (km/h) | 2.857 |
| b   | 80.01  |                       | 2.922 |
| <b>Modelo potencial calibrado (55.0%)</b> |        |                       |       |
| a   | 55.364 | Error estándar (km/h) | 2.37  |
| b   | 1.53   |                       | 0.136 |

##### 4.4.2 Constante de fricción F60

El factor de fricción F60 fue calibrado suponiendo un comportamiento lineal como recomienda la AIPCR y agregándole un factor exponencial que según Fuentes y Guanaratne (2011) depende del grado de deslizamiento del equipo de medición de microtextura. Debido que se utilizó como referencia el Péndulo de fricción, el factor  $\lambda$  a calcular será comparado con 1/2 que es el valor recomendado para equipos que tengan un porcentaje de deslizamiento entre 10 y 20% (14.5% para el Griptester). A continuación se presentan los modelos calibrados:

$$F60 = A + B * FR60 \quad (6)$$

$$F60 = A + (B * FR60)^\lambda \quad (7)$$

Tabla 3 Coeficientes para el Griptester para los modelos calibrados

| <b>Modelo lineal (S= 0.0469)</b>                           |        |                |           |
|--|--------|----------------|-----------|
| A  | 0.1099 | Error estándar | 0.003925  |
| B  | 0.933  |                | 0.01646   |
| <b>Modelo calibrado de Fuentes y Guanaratne (S=0.0451)</b> |        |                |           |
| A  | 0.0358 | Error estándar | 0.0154507 |
| B  | 0.7308 |                | 0.0335752 |
| $\lambda$  | 0.6772 |                | 0.0447051 |

El modelo que brindó mejores resultados fue el de Fuentes y Guanaratne ya que la varianza es menor. Sin embargo, puede verse que el valor de lambda no coincide con el valor sugerido por Fuentes y Guanaratne.

Para el Micro-Griptester se calibraron los mismos modelos anteriores, este no fue comparado con ningún otro valor ya que como se mencionó antes, durante el experimento de la AIPCR, el Micro-Griptester no existía. Los resultados se muestran en la Tabla 3, de la misma forma que para el Griptester, es el modelo de Fuentes y Guanaratne el que predice mejores resultados. Los valores de lambda son mas cercanos entre los modelos calibrados que comparados al valor de referencia (0.5), por lo tanto podría ajustarse un valor según el porcentaje de deslizamiento y no según un intervalo.

Tabla 3 Coeficientes para el Micro-Griptester para los modelos calibrados

| <b>Modelo lineal (S=0.0401)</b>                            |        |
|--|--------|
| A  | 0.1242 |
| B  | 0.7552 |
| <b>Modelo de Fuentes y Guanaratne calibrado (S=0.0378)</b> |        |
| A  | 0.0422 |
| B  | 0.5107 |
| $\lambda$  | 0.6157 |

## 5 Recomendaciones de valores de IFI

Con el fin de obtener valores de IFI según la geometría y velocidad de la vía se utilizaron los niveles de investigación e intervención de macrotextura (en MPD) y microtextura (GN, Griptester) utilizados en Australia y el Reino Unido respectivamente. Los valores del Griptester se dan para una velocidad de 50 km/h y los niveles de macrotextura se definen según la velocidad de la vía. La zonificación mostrada a continuación se tomó de la norma de resistencia la deslizamiento del Reino Unido actualizada en el 2004.

En la Tabla 4 se presentan los resultados para de niveles de investigación para velocidades mayores o iguales a 70 km/h; sin embargo también se obtuvieron valores para velocidades menores y niveles de intervención. Estos valores se encuentran en el documento completo.

Tabla 4 Niveles de investigación de IFI para diferentes tipos de zona con velocidades permitidas mayores o iguales a 70 km/h

| Velocidad  | Zona | Definición de la zona   | S <sub>p</sub> de investigación | F60 de investigación  |       |
|------------|------|---|---------------------------------|---|-------|
| >= 70 km/h | A    | Autopista (tramos de 100 m)                                     | 51.40 km/h                      | 0.281   |       |
|            | B    | Doble calzada (situación normal) (tramos de 100 m)              |                                 | 0.281   |       |
|            | C    | Doble calzada (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)  |                                 | 0.302   |       |
|            | D    | Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)  |                                 | 0.302   |       |
|            | E    | Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)  |                                 | 0.321   |       |
|            | F    | Aproximaciones y salidas de intersecciones principales (idem D) |                                 | 0.321   |       |
|            | G1   |   |                                 | Pendiente del 5% al 10% en más de 50 m (idem D)                           | 0.321 |
|            |      |   |                                 | Doble calzada (pendiente abajo)   |       |
|            |      |   |                                 | Calzada única (ambas pendientes)  |       |
|            | G2   |   |                                 | Pendiente superior al 10% en más de 50 m                                  | 0.340 |
|            |      |   |                                 | Calzada doble (pendiente abajo)   |       |
|            | H1   |   |                                 | Curva radio<250 m (idem D)  | 0.321 |
|            | J    |   |                                 | Aproximación a rotondas (idem D)  | 0.359 |
|            | K    |   |                                 | Aproximación a semáforos, pasos de peatones, paso de ferrocarril (idem D) | 0.359 |
| H2         |      | Curva radio<100 m (idem D) (medición a 20 km/h)                 | 0.340                           |   |       |
| L          |      | Rotonda (tramos de 10 m) (medición a 20 km/h)                   | 0.321                           |   |       |

## 6 Conclusiones

El coeficiente de fricción varía con respecto a la velocidad de deslizamiento, por lo tanto deben incluirse medidas de macrotextura para determinar la resistencia al deslizamiento. La utilización del valor de microtextura para caracterizar las condiciones de fricción de un pavimento es errónea, este valor debe estar siempre acompañado de la macrotextura para caracterizar correctamente al pavimento.

El Índice de Fricción Internacional incluye estos dos valores y caracteriza las condiciones reales del pavimento y determina cuál parámetro debe o no debe mejorarse en un pavimento. Por medio del IFI pueden establecerse niveles de investigación y de intervención según la geometría de la vía de acuerdo a experiencias nacionales e internacionales.

Los coeficientes de la AIPCR deben ser revisados, así como también la metodología; las mediciones mediante diferentes equipos deben ser calibradas según experiencias internacionales que hayan brindado mejores resultados. Para que exista una escala única de evaluación de los pavimentos se requiere de la implementación del IFI, por lo tanto debe continuarse el trabajo en este tema para obtener modelos que brinden mejores predicciones entre los diferentes tipos de equipos.

## Referencias

- [1] Wambold, J., Antle, C., Henry, J., & Rado, Z. (1995). Experimento Internacional AIPCR de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento. Asociación Mundial de la Carretera PIARC, Francia.
- [2] Roa, J. (2008). Evaluation of International Friction Index and High-Friction Surfaces. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- [3] Noyce, D.A., Bahia, H.U., Yambo, J.M., y Guisk, K. (2005) "Incorporating road safety into pavement management: Maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements." Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory.
- [4] Choubane, B., Holzschuher, C.R., y Gokhale, S. (2004). Precision of Locked-Wheel Testers for Measurement of Roadway Surface Friction Characteristics. Transportation Research Record 1869, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- [5] Linder, M., Kröger, M., Popp, K., y Blume, H. (2004). Experimental and Analytical Investigation of Rubber Friction. XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Poland.
- [6] Yeaman, J. (2005). Are we afraid of the IFI? Pavement Management Services Pty Ltd.
- [7] Sullivan, B. (2002). A fundamental approach to the skidding resistance using the IFI. Pavement Management Services.
- [8] Flintsch, G., de León, E., McGhee, K., & Roa, J. (2009). *Evaluation of the International Friction Index Coefficients for Various Devices*. Transportation Research Board.
- [9] Kohler, E., Salgado, M., & Achurra, S. (2012). Técnicas e Índices para Evaluación de Macrotectura en Pavimentos. Universidad EAFIT, Colombia.
- [10] Andrew Mergenmeier, P. (2012). Development and Demonstration of Pavement Friction Management Programs. Federal Highway Administration.
- [11] Fuentes, L., & Gunaratne, M. (2010). *Evaluation of the Speed Constant and Its Effect on the Calibration of Friction-Measuring Devices*. Transportation Research Board.
- [12] Fuentes, L., & Gunaratne, M. (2011). *Revised Methodology for Computing International Friction Index*. Transportation Research Board.
- [13] Iskander, R., & Stevens, A. The Effectiveness of the Application of High Friction Surfacing on Crash Reduction. Auckland, New Zealand.
- [14] Jackson, N. (2008). Harmonization of Texture and Skid-Resistance Measurements. University of North Florida, College of Computing, Engineering and Construction, Florida.

[15] Jackson, N. (2005). Measuring Pavement Friction Characteristics at Variable Speeds for Added Safety. University of North Florida, Division of Engineering, Florida.

[16] Leiva, F. (2005). Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos. LanammeUCR.

[17] Sinhal, R. (2005). The implementation of a Skid Policy to Provide the Required Friction Demand on the Main Road Network in The United Kingdom. Highways Agency, UK.

[18] Trifirò, F., Flintsch, G., Guerrero, G., de León, E., & McGhee, K. (2008). Comparison of Friction Measuring Devices and Preliminary Evaluation of the International Friction Index Coefficients. Transportation Research Board.

[19] Wallman, C., & Astrom, H. (2001). Friction Measurement Methods and the Correlation between Road Friction and Traffic Safety. Swedish National Road and Transport Research Institute.