Instituto Mexicano del Transporte

COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No. IE 14/15:

DETERMINACIÓN DEL MODELO DE AJUSTE PARA LA DETERMINACIÓN DEL IFI EN CARRETERAS MEXICANAS CON EQUIPO MU METER

Responsable del proyecto:

Ing. Alfonso Pérez Salazar
Jefe de Grupo de Investigación Mecánica de Geomateriales

Aprobó:

Ing. Rodolfo Téllez Gutiérrez
Coordinador de Infraestructura

Autorizó:

M. en C. y M. en I José San Martín Romero
Director General

29 de diciembre de 2015

Créditos y Agradecimientos

El presente trabajo de investigación denominado ***"*DETERMINACIÓN DEL MODELO DE AJUSTE PARA LA DETERMINACIÓN DEL IFI EN CARRETERAS MEXICANAS CON EQUIPO MU METER*"*** fue desarrollado por los siguientes investigadores del Instituto Mexicano del Transporte Ing. Alfonso Pérez Salazar, María Guadalupe López Domínguez y Dr. Paul Garnica Anguas.

Se agradece la colaboración de la Ingeniera Santa Ludinette Cárdenas Rodríguez, los asistentes de Investigación, Ema Saraí Ayuso González y Federico Castro Mondragón, así como los técnicos Mario Antonio Pérez González y Miguel Ángel Cervantes Nieto.

Especial agradecimiento al Ingeniero Antonino Noé Robles Hernández de la Dirección General de Servicios Técnicos y a su personal por el apoyo durante las mediciones en campo y la coordinación de los trabajos desarrollados en el presente proyecto, así como el apoyo de las empresas Geosol S.A., Urba Ingeniería S.A. de C.V. y Soluciones e Ingeniería en Vías Terrestres S.A. de C.V.

Índice

Créditos y Agradecimientos 2
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 4
Resumen 5
1 Introducción 5
1.1 Objetivos del estudio 5
1.1.1. Objetivos específicos 5
1.2 Alcances 6
2 Obtención de parámetros sobre los tramos de prueba para obtener el IFI 6
2.1 Determinación de la macrotextura con círculo de arena 6
2.2 Determinación del coeficiente de fricción con péndulo británico. 7
2.3 Determinación del coeficiente de fricción con mu meter 9
3 Obtención de curvas maestras del IFI, a partir de péndulo británico y círculo de arena 10
4 Obtención de curvas maestras del IFI, a partir de mu meter y círculo de arena. 18
5 Conclusiones y Recomendaciones 26
6 Bibliografía 27

Índice de Figuras

Figura 3.1 Curva maestra de IFI para el tramo 8c sin recubrimiento 13
Figura 3.2 Curva maestra de IFI para el tramo 8c con recubrimiento 14
Figura 3.3 Curva maestra de IFI para el tramo 9A 14
Figura 3.4 Curva maestra de IFI para el tramo 9B 15
Figura 3.5 Curva maestra de IFI para el tramo 8E 15
Figura 3.6 Curva maestra de IFI para el tramo 11A 16
Figura 3.7 Curva maestra de IFI para el tramo 11B 16
Figura 3.8 Curva maestra de IFI para el tramo 2A 17
Figura 3.9 Curva maestra de IFI para el tramo 2B 17
Figura 3.10 Curva maestra de IFI para el tramo 4 18
Figura 4.1 Curva de IFI para el tramo 8c sin recubrimiento, a partir de FR con mu meter 19
Figura 4.2 Curva de IFI para el tramo 8c con recubrimiento, a partir de FR con mu meter 19
Figura 4.3 Curva de IFI para el tramo 9A, a partir de FR con mu meter 20

Figura 4.4 Curva de IFI para el tramo 9B, a partir de FR con mu meter……20
Figura 4.5 Curva de IFI para el tramo 8E, a partir de FR con mu meter……21
Figura 4.6 Curva de IFI para el tramo 11A, a partir de FR con mu meter……..21
Figura 4.7 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter……..22
Figura 4.8 Curva de IFI para el tramo 2A, a partir de FR con mu meter……22
Figura 4.9 Curva de IFI para el tramo 2B, a partir de FR con mu meter……23
Figura 4.10 Curva de IFI para el tramo 4, a partir de FR con mu meter……23
Figura 4.11 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra……...24
Figura 4.12 Relación entre los valores de CF a 60km/h para mu meter contra curva maestra..24
Figura 4.13 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter, ajustada con coeficientes A y B propuestos y comparada contra la curva maestra……25

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (Círculo de arena)……..…… 7
Tabla 2.2. Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba…….. 9
Tabla 2.3. Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los Tramos de prueba…… 10
Tabla 3.1. Valores de la constante de referencia de la velocidad (S_p) en función de la macrotextura por tramo evaluado……..……11
Tabla 3.2. Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con péndulo británico…….…… 12
Tabla 3.3. Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60)…… 13
Tabla 4.1. Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter……..……..18

Resumen

El Ing. Clemente Poon Hung, Director General de la Dirección General de Servicios Técnicos, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, solicitó al IMT, determinar los parámetros de ajuste que deberán ser utilizados en la metodología del cálculo del IFI, en virtud de que en sus programas de auscultación se están realizando mediciones del coeficiente de fricción y el cálculo del índice de Fricción Internacional (IFI), lo anterior para 60 131 km de la red federal de carreteras.

Se presentan los resultados de las determinaciones de Coeficiente de fricción con péndulo británico y mu meter, así como de macrotextura con círculo de arena; con la finalidad de establecer la relación entre los dos equipos que determinan coeficiente de fricción, y con ayuda de la macrotextura, y dado que esta última y el péndulo británico fueron dos de los equipos armonizados en el experimento PIARC para determinar el IFI, establecer los parámetros que mejor ajusten la curva obtenida con mu meter a la curva de referencia del IFI.

1 Introducción

El presente informe corresponde la determinación de los parámetros de ajuste A y B necesarios para obtener el IFI con equipo mu meter.

1.1 Objetivos del estudio

Definir los parámetros de ajuste A y B que mejor satisfagan la relación coeficiente de fricción-velocidad, misma que es función de la macrotextura y que constituye al modelo IFI.

1.1.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Definir los diferentes tramos homogéneos con un abanico en los valores de interés , en este caso coeficiente de fricción y macrotextura
- Determinar los valores de fricción de referencia de coeficiente de fricción con péndulo británico y macrotextura con círculo de arena.
- A partir de los valores de referencia obtener las curvas de IFI para cada tramo, utilizando los coeficientes establecidos en la metodología emanada del experimento PIARC.
- Obtener los valores de coeficiente de fricción con mu meter, del cual no se presenta armonización en el experimento PIARC y por ende no se presentaron sus coeficientes A y B de ajuste.
- Ajustar las curvas coeficiente de fricción-velocidad obtenidas por mu meter a las curvas obtenidas con péndulo británico tomadas como referencia, toda vez que este último si participó en la armonización y se cuenta con parámetros de ajuste para obtener la curva maestra Coeficiente de fricción- velocidad.

1.2 Alcances

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) determinará los parámetros A y B de ajuste con los cuales se presume se pueden obtener las curvas maestras de coeficiente de fricción–velocidad que establece el modelo del IFI.

Lo anterior se realizará para varios tramos de prueba con diferentes valores tanto de macrotextura como de coeficiente de fricción.

2 Obtención de parámetros sobre los tramos de prueba para obtener el IFI.

2.1 Determinación de la macrotextura con círculo de arena.

En este apartado se presenta la metodología utilizada para obtener la macrotextura en los diferentes tramos de prueba, así como los resultados obtenidos.

Para la determinación de la macrotextura con círculo de arena se utilizó la metodología establecida en la normativa ASTM E 965, misma que establece la utilización de microesferas de vidrio para tal fin, las esferas deben cumplir con un 90 % de redondez de acuerdo con la norma ASTM D1155 y contar con una distribución granulométrica en la que al menos el 90% del material, en masa pase la malla No. 60 y se retenga en la malla No. 80.

El ensaye se realizó de la siguiente manera; se realizó una inspección de la superficie de pavimento por evaluar y se seleccionó un lugar seco, un área homogénea que no contenga características únicas o localizadas tales como grietas y juntas. Se limpió a fondo la superficie utilizando un cepillo de cerdas suaves para eliminar residuos, escombros o partículas de agregados con pérdida de adherencia de la superficie y se colocó la pantalla contra viento alrededor de la superficie de ensaye.

Una vez realizado lo anterior, se llenó un cilindro de volumen conocido con el material seco y se golpeó suavemente la base del cilindro varias veces sobre una superficie rígida, con la finalidad de lograr un mejor acomodo del material; se añadió más material para llenar el cilindro en la parte superior, y se niveló con ayuda de una regla.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a verter el volumen medido del material sobre la superficie limpia dentro del área protegida por la pantalla contra viento. Se distribuyó con cuidado el material dentro del círculo con la herramienta para dispersar, llenando los vacíos de la superficie al ras de las puntas de las partículas de agregado. Se midieron y registraron los diámetros de la superficie circular cubierta por el material en un mínimo de cuatro puntos equidistantes alrededor de la circunferencia de la muestra, para posteriormente calcular y registrar el diámetro medio.

Es importante destacar que se realizaron veinte determinaciones, uniformemente espaciadas para la obtención de la media de la profundidad en la macrotextura sobre la superficie de un tipo de pavimento. La media aritmética de los valores individuales de la profundidad en la macrotextura se considera la media de la profundidad de la macrotextura para la superficie de un pavimento ensayado.

De acuerdo con el procedimiento anterior, se calculó la profundidad media de la macrotextura como:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Donde:

MTD= profundidad media de la macrotextura de un pavimento, mm

V= volumen de la muestra, mm^3

D= media del diámetro del área cubierta por el material, mm

Toda vez que el volumen del cilindro es conocido y determinado con anterioridad.

Los resultados de macrotextura obtenidos con la metodología citada, se presentan en la Tabla 1, para cada tramo de prueba.

Tabla 2.1. Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena).

	Macrotextura (mm)	
Tramo	promedio	desv. Std
8c (sin Rec)	0.73	0.14
8c (con Rec)	1.41	0.28
9A	0.4	0.09
9B	0.33	0.04
8e	1.01	0.21
11A	0.83	0.27
11B	0.89	0.16
2A	1.4	0.28
2B	1.01	0.29
4	1.27	0.23

2.2 Determinación del coeficiente de fricción con péndulo británico.

En lo que sigue se presenta la metodología para obtener el coeficiente de fricción con péndulo británico y los resultados a partir de su aplicación en los tramos de prueba.

Antes de determinar la fricción con el péndulo, es importante asegurarse que la superficie de ensayo en campo debe estar libre de partículas sueltas y, en su caso, se limpiará con una brocha; la superficie no tiene que ser horizontal ya que el péndulo puede ser nivelado, utilizando únicamente los tornillos de nivelación.

Una vez limpia la superficie, se niveló el instrumento girando los tornillos de nivelación hasta centrar la burbuja del nivel; posteriormente, se ajustó el péndulo a la marca de cero, primeramente se elevó el mecanismo del péndulo aflojando los tornillos de seguridad (ubicados directamente detrás del pivote del péndulo) y se giraron los tornillos de la cabeza móvil ubicados en el centro del instrumento, para que la zapata oscilara libremente. Se apretaron firmemente los tornillos de seguridad. Se colocó el péndulo en posición horizontal y se movió la aguja indicadora en el sentido de las manecillas del reloj hasta la posición de reposo contra el tornillo de ajuste en el brazo del péndulo. Se liberó el péndulo y se registró la lectura de la aguja indicadora. En el caso en el que la lectura no fue cero, se aflojó el anillo del seguro y se giró suavemente el anillo de fricción en el eje de soporte y se asegura nuevamente. Se repitió el procedimiento y se ajustó el anillo de fricción hasta que el movimiento oscilatorio del péndulo llevó a la aguja a la posición de cero.

Con el péndulo ajustado a cero, se procedió a ajustar la longitud de deslizamiento en la superficie de prueba, con el brazo del péndulo suspendido libremente, se insertó el espaciador debajo del tornillo de ajuste de la palanca de elevación de la zapata. Se bajó el péndulo de tal manera que el borde de la zapata tocara la superficie a medir. Se aseguró el péndulo firmemente, se levantó la palanca de elevación de la zapata y se retiró el espaciador. Posteriormente, se levantó la zapata con la palanca de elevación y se desplazó el péndulo hacia la derecha y se bajó la zapata permitiendo que el péndulo se moviera libremente hacia la izquierda lentamente hasta que el borde de la zapata hiciera contacto con la superficie. Para verificar la longitud de deslizamiento, se colocó el medidor de la longitud de contacto a un lado de la zapata y paralelo a la dirección del movimiento oscilatorio. Se levantó la zapata y se desplazó el péndulo hacia la izquierda. Se liberó la zapata y lentamente se movió el péndulo hacia la derecha hasta que el borde de la zapata entrara en contacto con la superficie. Si la superficie de contacto no se encontraba entre 124 a 127 mm medido entre el borde de entrada y borde de salida del recorrido de la zapata, se ajustó subiendo o bajando el aparato con el tornillo frontal de nivelación o con los tornillos de ajuste de altura vertical. De ser necesario de ajustó nuevamente el nivel del péndulo. Se colocó el péndulo de manera horizontal y se movió la aguja indicadora en el sentido de las manecillas del reloj hasta tocar con el tornillo de ajuste en el brazo del péndulo.

Una vez realizado lo anterior se procedió a realizar 5 mediciones de coeficiente de fricción con el péndulo en veinte puntos distribuidos a lo largo de la rodera externa de cada tramo de prueba, de la siguiente manera; se aplicó agua suficiente para cubrir completamente el área de prueba, se ejecutó un movimiento oscilatorio pero sin registrar los datos; tan pronto como fue posible, se realizaron cinco oscilaciones del péndulo (medición de fricción), agregando agua a la superficie entre cada una y se registraron los resultados, cuyo promedio aparece en la Tabla 2.

Tabla 2.2. Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba.

Fricción
Péndulo Británico

Tramo	promedio	desv. Std
8c (sin Rec)	72	4
8c (con Rec)	67	1.5
9A	45	2
9B	44	2
8e	76	3
11A	60	4
11B	57	2.5
2A	62	5
2B	55	3.5
4	54	3

2.3 Determinación del coeficiente de fricción con mu meter.

La determinación del coeficiente de fricción se realizó de la siguiente manera; antes de cada serie de pruebas, se calentaron los neumáticos recorriendo al menos 8 km (5 millas) a velocidades usuales de tránsito en la posición normal de no divergencia de las llantas. Se colocaron las llantas de prueba en la posición de divergencia y la tercera rueda en la posición abajo. Posteriormente, se realizaron las pruebas a una velocidad de 65 ± 1,6 km/h, se cuidó que de mantener la velocidad de prueba de 65 km/h dentro del rango ± 1,6 km/h.

En cuanto a los tramos de prueba, es importante destacar que se tuvo cuidado de evitar curvas cerradas y pendientes pronunciadas, o con pasos a nivel. Se intentó mantener los tramos de prueba lo más uniforme posible, de manera que el promedio resultante de la prueba registrada será el promedio de una superficie uniforme. En este caso, las pruebas se realizaron con la rueda derecha de prueba en la parte central de la trayectoria de desgaste de la rodera derecha del carril de tránsito.

En el desarrollo de la prueba para determinar el coeficiente de fricción de cada tramo, se llevó el equipo a la velocidad de prueba, aplicando el agua a los neumáticos de prueba aproximadamente 1 segundo antes de iniciar la prueba y se continuó hasta que se completó esta. Los números Mu se mostraron en la pantalla de la laptop de cabina, junto con otros datos reportados como necesarios de acuerdo a la norma nacional seleccionada y se registraron los promedios por tramo para cada una de las cuatro pasadas realizadas sobre cada uno de ellos, mismos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2.3. Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramos de prueba.

	Fricción mu meter	
Tramo	promedio	desv. Std
8c (sin Rec)	0.63	0.04
8c (con Rec)	0.66	0.015
9A	0.25	0.02
9B	0.26	0.02
8e	0.57	0.03
11A	0.45	0.04
11B	0.48	0.025
2A	0.35	0.05
2B	0.35	0.035
4	0.4	0.03

3 Obtención de curvas maestras del IFI, a partir de péndulo británico y círculo de arena.

En virtud de que, tanto el péndulo británico y el circulo de arena para determinar coeficiente de fricción y macrotextura, respectivamente, fueron metodologías armonizadas en el experimento PIARC, se procedió a obtener las curvas maestras de fricción-velocidad, de acuerdo con dicha metodología.

Primeramente, y de acuerdo con el procedimiento, se procedió a la definición de S_p a partir de los valores de textura (Tx) obtenidos para cada tramo de prueba, con la siguiente expresión:

$$S_p = a + bTx \qquad 1)$$

Para Tx en milímetros.

En este caso para círculo de arena se tiene de la Tabla 24 en página 136 del documento PIARC, a = -11.59 y b = 113.63 de aquí que;

$$S_p = -11.59 + (113.63)Tx$$

Para este caso y aplicable a todos los tramos de prueba evaluados con éste procedimiento; en la Tabla 3.1 se presentan los resultados de la aplicación de la expresión 1).

Tabla 3.1. Valores de la constante de referencia de la velocidad (S_p) en función de la macrotextura por tramo evaluado.

	S_P (km/h)
Tramo	promedio
8c (sin Rec)	147.49
8c (con Rec)	71.35
9A	39.54
9B	102.03
8e	103.17
11A	82.72
11B	89.53
2A	147.49
2B	103.17
4	132.72

Una vez determinado el valor de S_p se procedió a determinar el valor de la fricción de cada tramo a 60 km/h (FR60), lo anterior a partir de los datos obtenidos con péndulo británico, considerando una velocidad media de medición (S) de 10 km/h para este equipo, y para la expresión 2) definida por la metodología adoptada para el IFI, se tiene:

$$FR60 = FRS \times e^{(S-60)/Sp} \qquad 2)$$

Donde:

FR60 es el valor ajustado de la fricción de cualquier velocidad s a 60 km/h

FRS es el coeficiente de fricción determinado con péndulo británico

SP es la constante de referencia de la velocidad (SP) en función de la macrotextura

S es la velocidad de medición del coeficiente de fricción en este caso 10 km/h para péndulo británico

Aplicando la expresión 2 a cada tramo de prueba y utilizando los valores de la Tabla 2.2 y 3.1, se obtienen los valores de Fr60 para cada tramo de prueba cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con péndulo británico.

	FR60
Tramo	promedio
8c (sin Rec)	47.74
8c (con Rec)	35.73
9A	10.28
9B	26.95
8e	46.81
11A	32.78
11B	32.61
2A	44.17
2B	33.88
4	37.05

Una vez definido el valor de FR60 para cada tramo evaluado se procedió a determinar la curva maestra del IFI para cada tramo con la expresión 3).

$$F60 = A + B \times FR60 \qquad 3)$$

En el que:

F60 representa el valor de la fricción del modelo IFI a 60 km/h

A y B son constates del modelo para llevar el valor de fricción a 60 km/h de cualquier equipo participante en la armonización, al valor del internacionalmente aceptado del IFI.

FR60 valor de la fricción a 60 km/h con el equipo de medición.

En este caso, para el péndulo británico, A = 0.078 y B = 0.01071, de acuerdo con la Tabla 25 que aparece en la página 140 del documento PIARC. Sustituyendo:

$$F60 = 0.078 + 0.01071 \times FR60$$

Aplicando la ecuación 3) y haciendo uso de los valores presentados en las Tabla 3.2 se obtuvieron los resultados de F60 que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60).

F60	
Tramo	promedio
8c (sin Rec)	0.5892
8c (con Rec)	0.4606
9A	0.188
9B	0.3667
8e	0.5793
11A	0.4291
11B	0.4272
2A	0.5511
2B	0.4408
4	0.4747

A partir de los valores F60 de cada tramo, es posible obtener la Golden Curve o curva maestra del IFI, en donde se relaciona el coeficiente de fricción a cualquier velocidad y cuyo patrón de variación depende de la macrotextura del pavimento evaluado, en las Figuras 1 a 10 se pueden apreciar las curvas del modelo IFI para cada tramo evaluado.

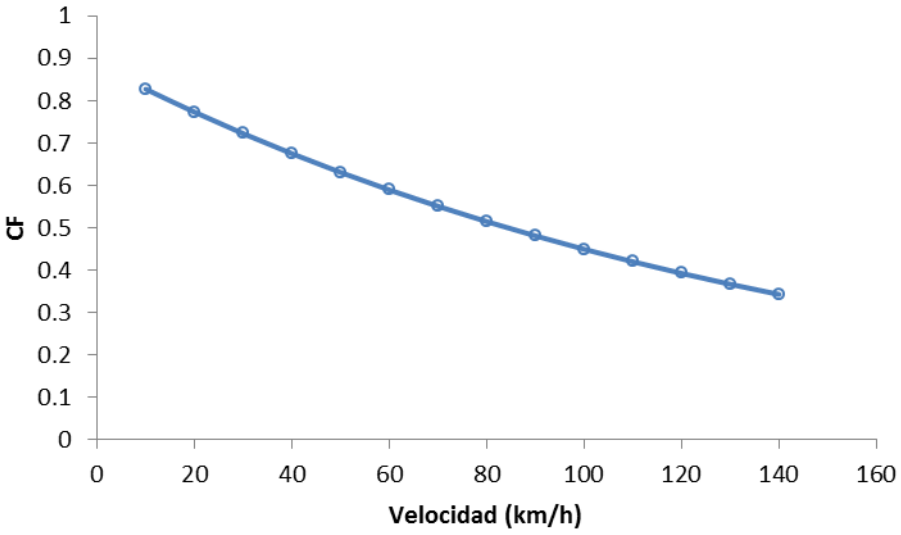

Figura 3.1 Curva maestra de IFI para el tramo 8c sin recubrimiento.

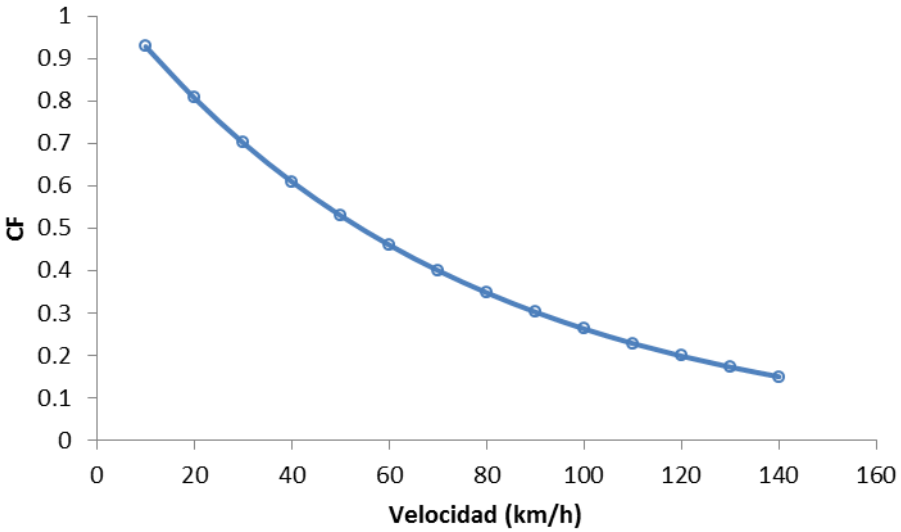

Figura 3.2 Curva maestra de IFI para el tramo 8c con recubrimiento.

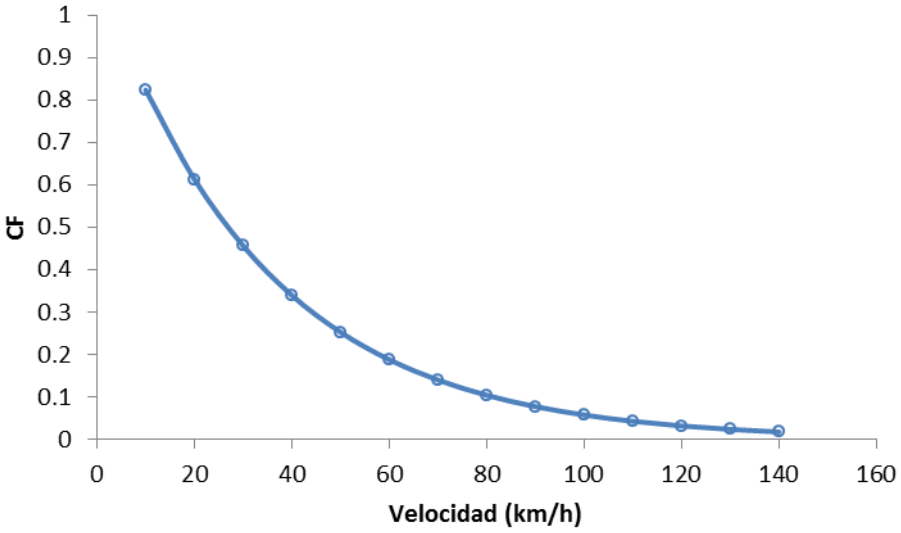

Figura 3.3 Curva maestra de IFI para el tramo 9A.

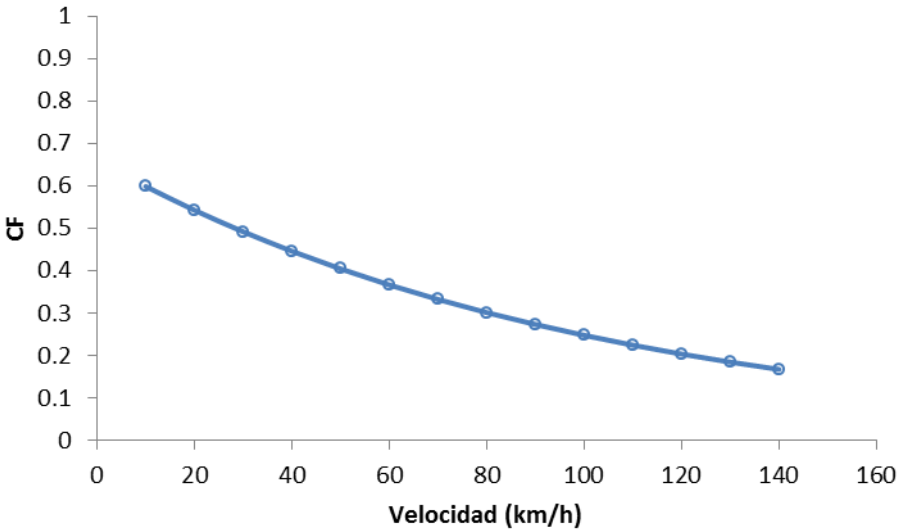

Figura 3.4 Curva maestra de IFI para el tramo 9B.

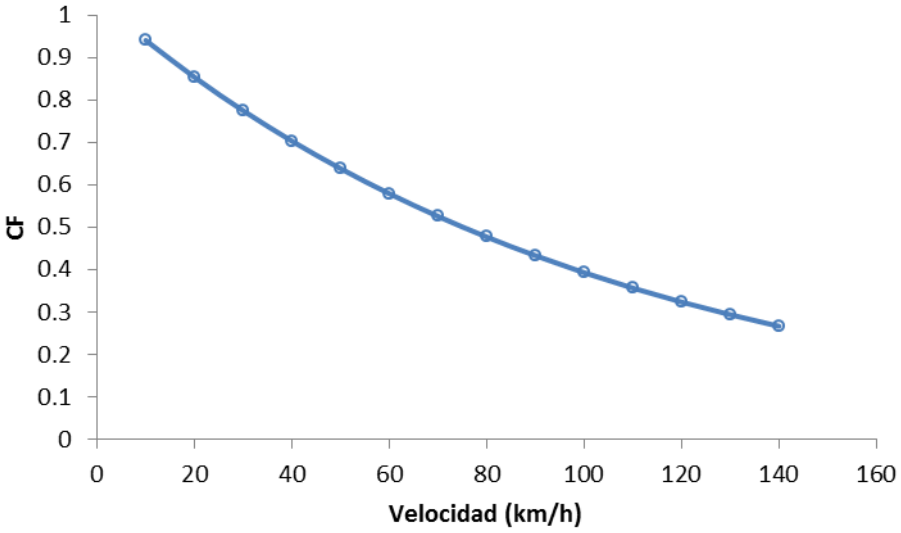

Figura 3.5 Curva maestra de IFI para el tramo 8E.

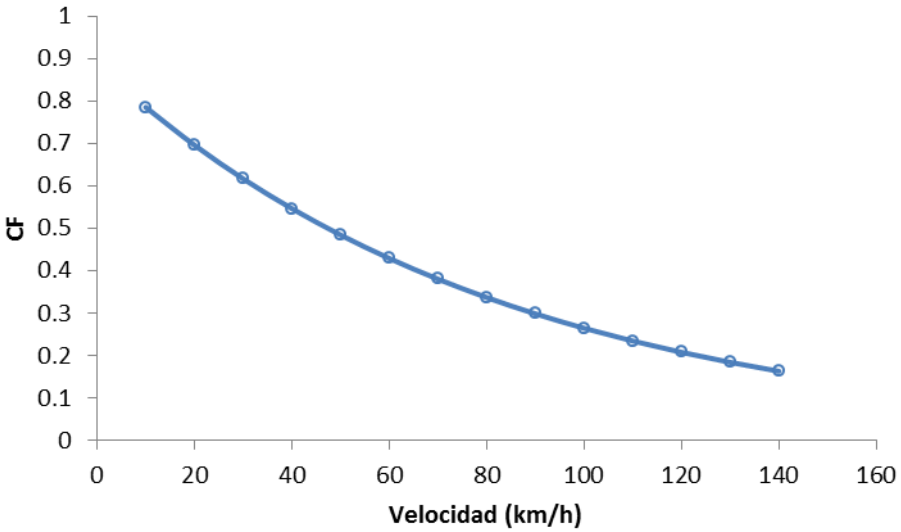

Figura 3.6 Curva maestra de IFI para el tramo 11A.

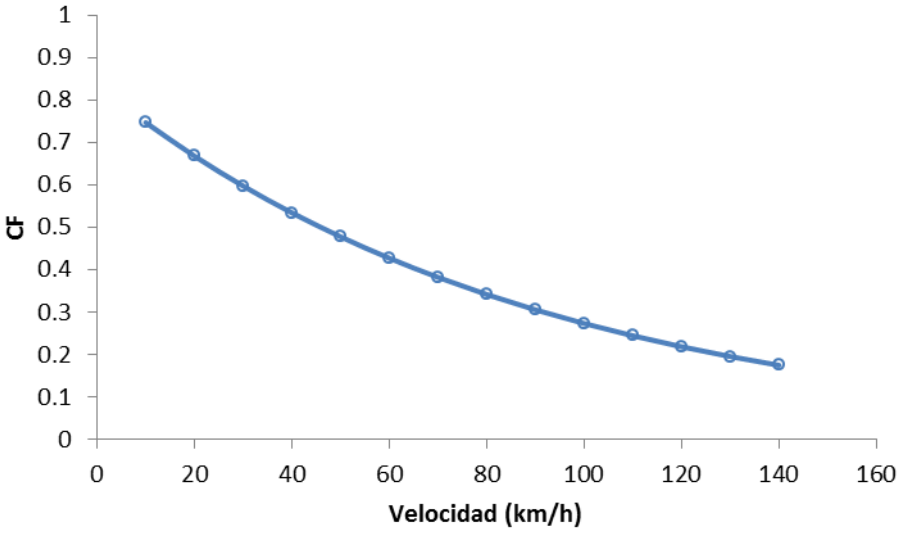

Figura 3.7 Curva maestra de IFI para el tramo 11B.

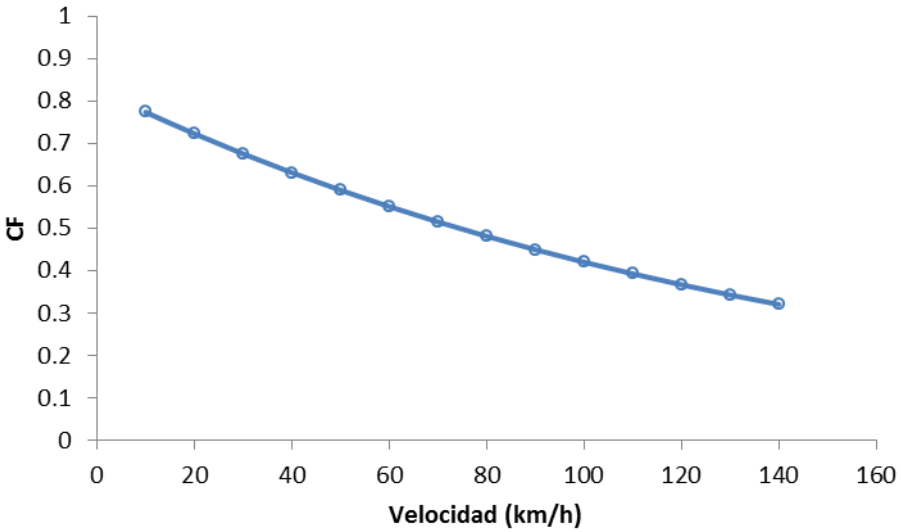

Figura 3.8 Curva maestra de IFI para el tramo 2A.

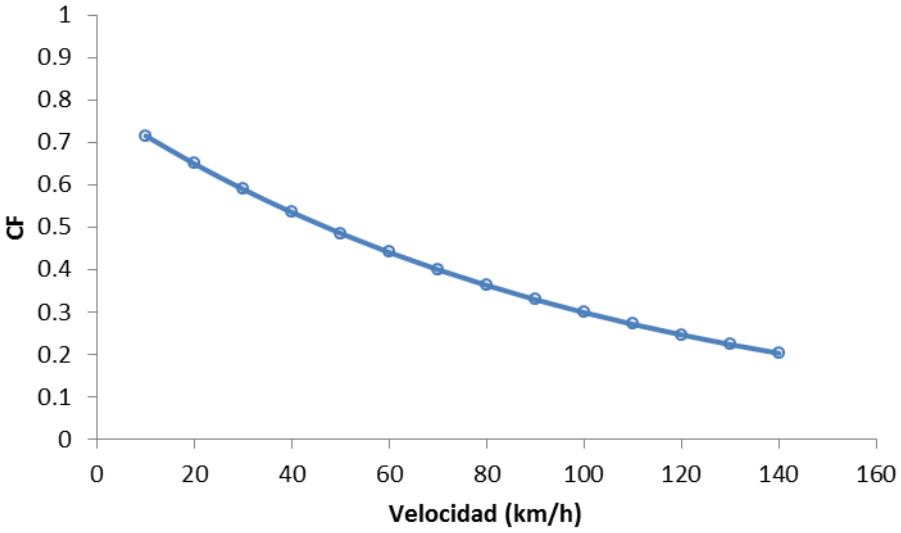

Figura 3.9 Curva maestra de IFI para el tramo 2B.

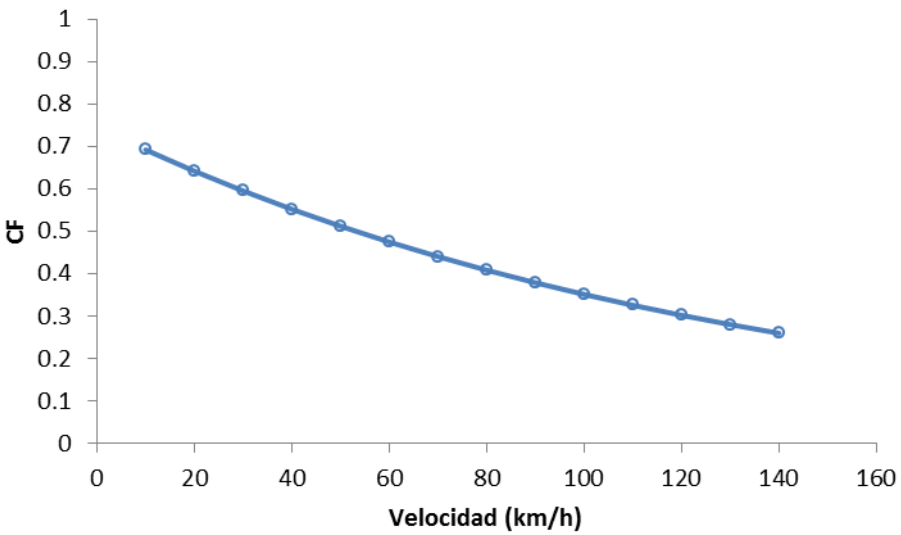

Figura 3.10 Curva maestra de IFI para el tramo 4.

4 Obtención de curvas maestras del IFI, a partir de mu meter y círculo de arena.

Haciendo uso de los valores de S_p, obtenidos en el apartado 3 y mostrados en la Tabla 3.1, y dado que la macrotextura se obtuvo con círculo de arena, se procede a determinar los valores de FR60 para cada tramo de prueba evaluado con mu meter, aplicando la expresión 2) sólo que en este caso la velocidad corresponde a $v_{mu\ meter}$ = sen(7.5°)(65km/h) = 8.48202 km/h, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter.

	FR60
Tramo	promedio
8c (sin Rec)	0.4654
8c (con Rec)	0.3060
9A	0.0679
9B	0.1569
8e	0.3824
11A	0.2414
11B	0.2700
2A	0.2468
2B	0.2124
4	0.2713

Una vez que se cuenta con los valores de fricción a 60 km/ h para el equipo, se proceden a determinar las gráficas de fricción-velocidad en el formato de IFI, para, en este caso el mu meter. Es importante mencionar que todavía en este punto no corresponden a las curvas maestras del modelo del IFI, sino que éstas deberán ajustarse a las obtenidas en el apartado 3 para cada tramo de prueba, cuyos coeficientes de ajuste corresponderán a los parámetros A y B del modelo IFI buscados.

En las Figuras 4.1 a 4.10 se presentan las relaciones coeficiente de fricción-velocidad obtenidas a partir de FR60, para cada tramo evaluado.

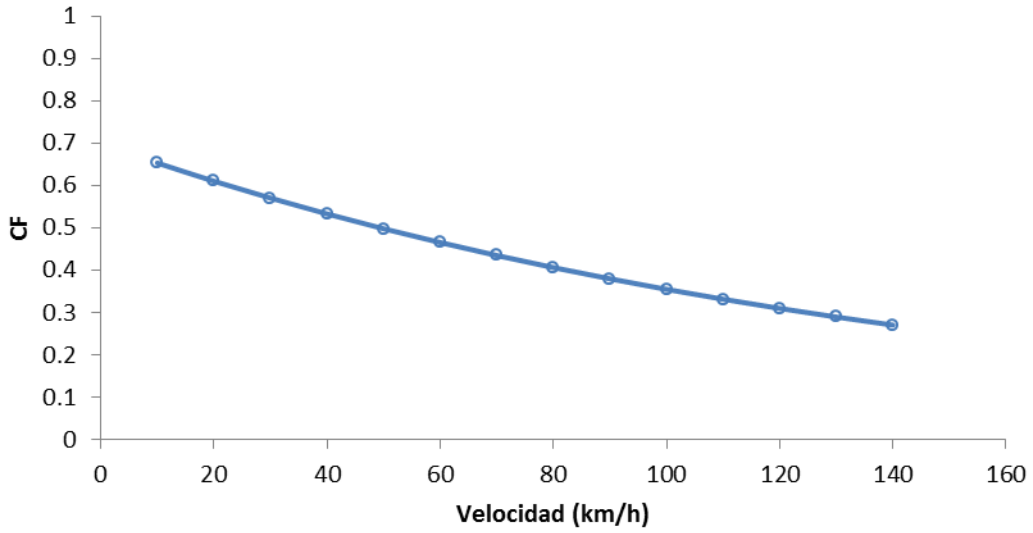

Figura 4.1 Curva de IFI para el tramo 8c sin recubrimiento, a partir de FR con mu meter.

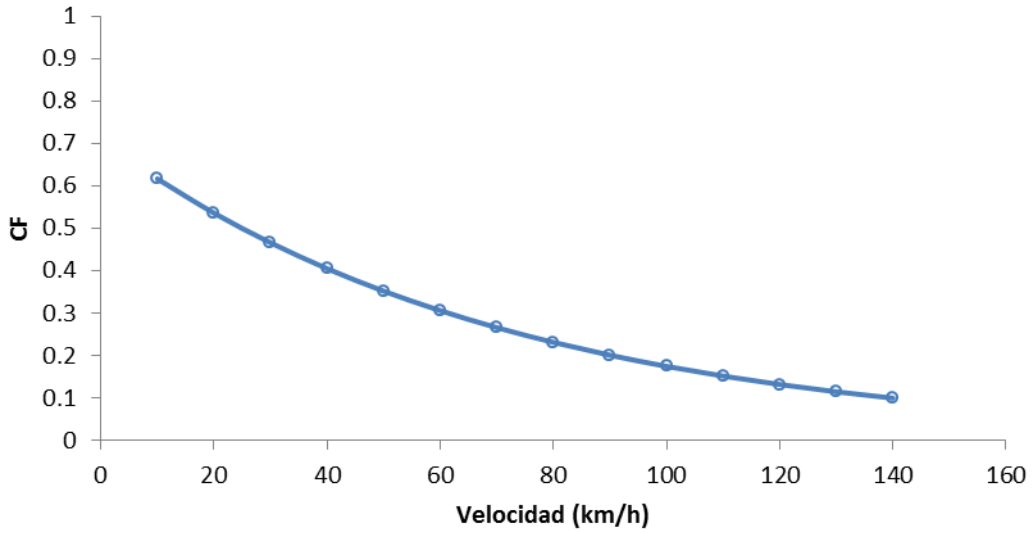

Figura 4.2 Curva de IFI para el tramo 8c con recubrimiento, a partir de FR con mu meter.

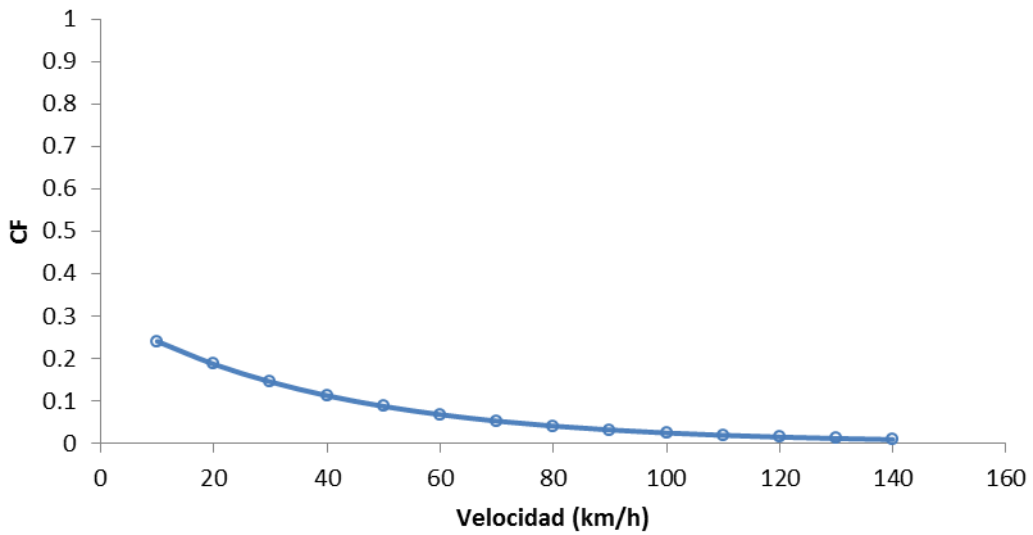

Figura 4.3 Curva de IFI para el tramo 9A, a partir de FR con mu meter.

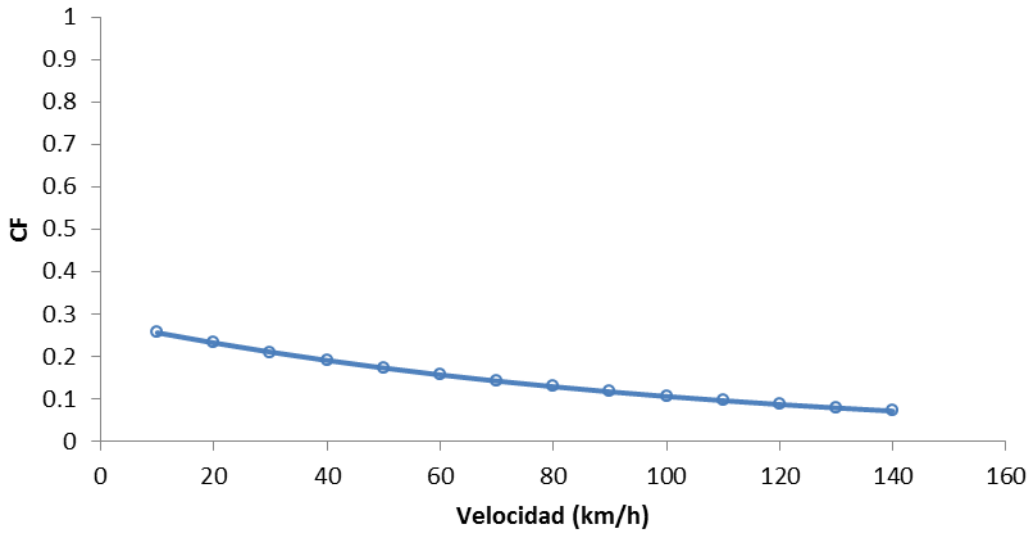

Figura 4.4 Curva de IFI para el tramo 9B, a partir de FR con mu meter.

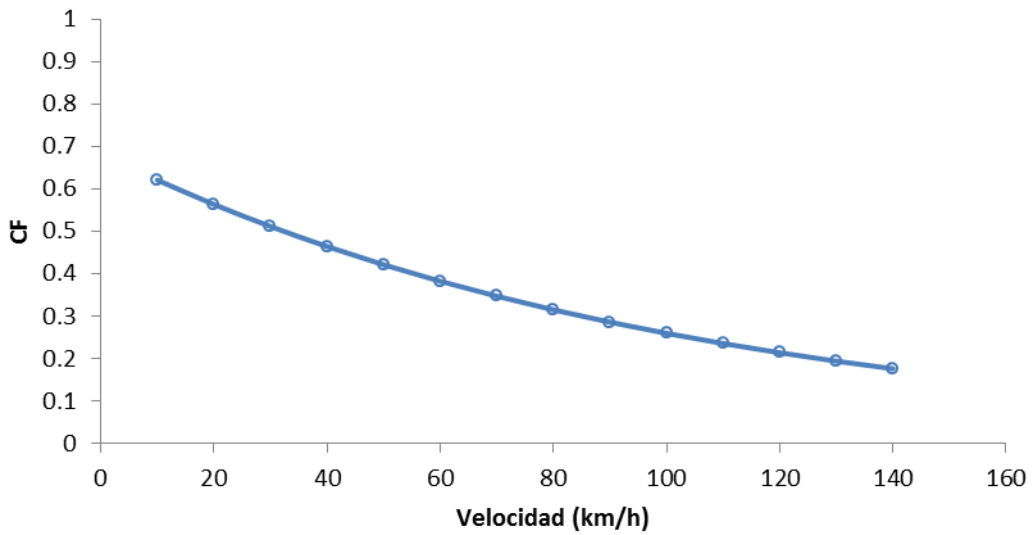

Figura 4.5 Curva de IFI para el tramo 8E, a partir de FR con mu meter.

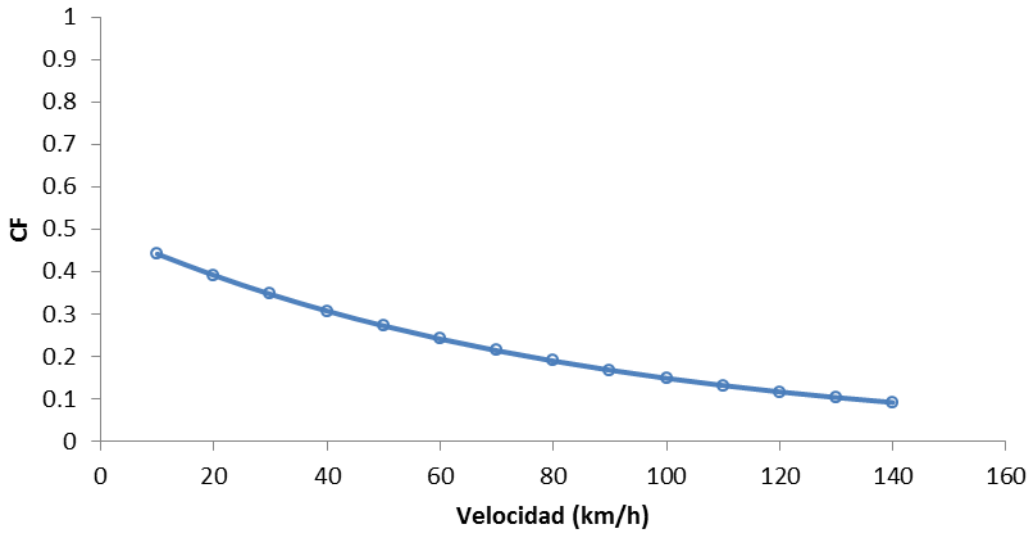

Figura 4.6 Curva de IFI para el tramo 11A, a partir de FR con mu meter.

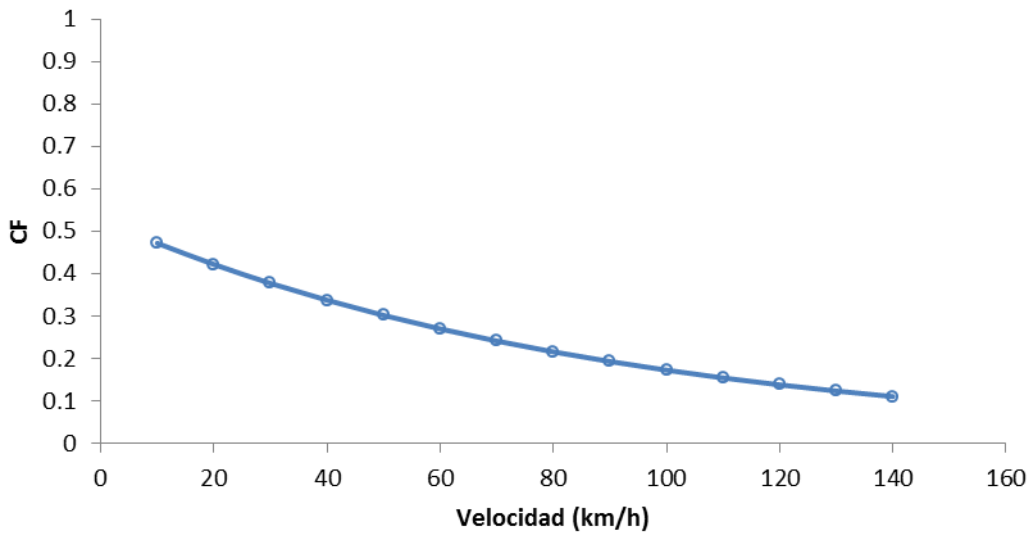

Figura 4.7 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter.

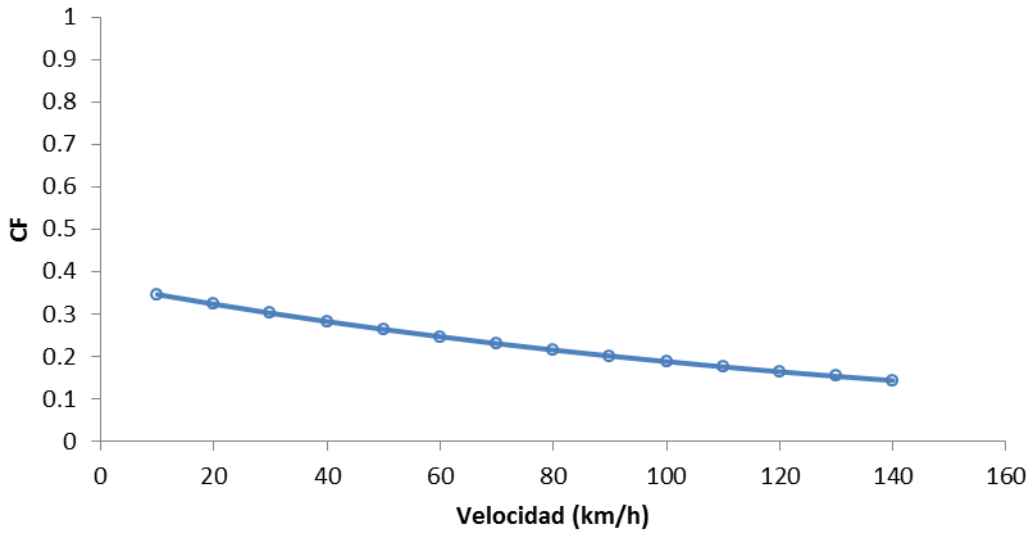

Figura 4.8 Curva de IFI para el tramo 2A, a partir de FR con mu meter.

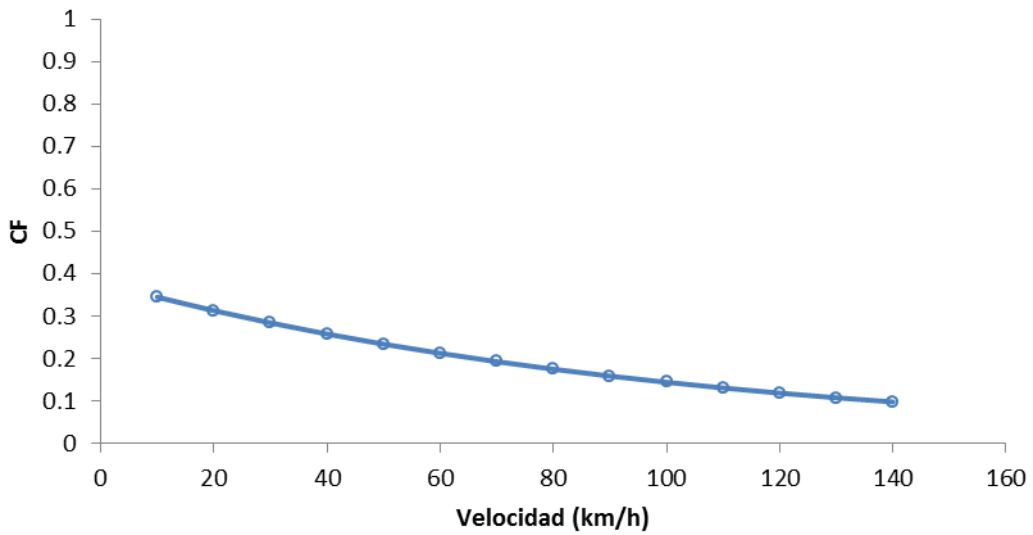

Figura 4.9 Curva de IFI para el tramo 2B, a partir de FR con mu meter.

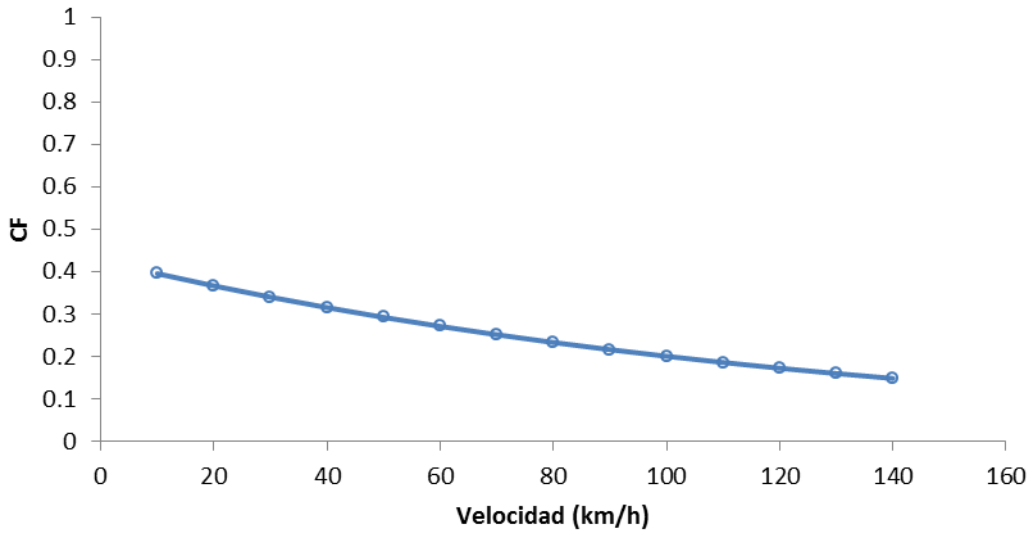

Figura 4.10 Curva de IFI para el tramo 4, a partir de FR con mu meter.

A manera de ejemplo, en la Figura 4.11 se muestra la curva de uno de los tramos comparada contra la maestra (IFI), los coeficientes de ajuste A y B que se propongan, llevarán a la curva roja (mu meter) hacia la azul (Maestra).

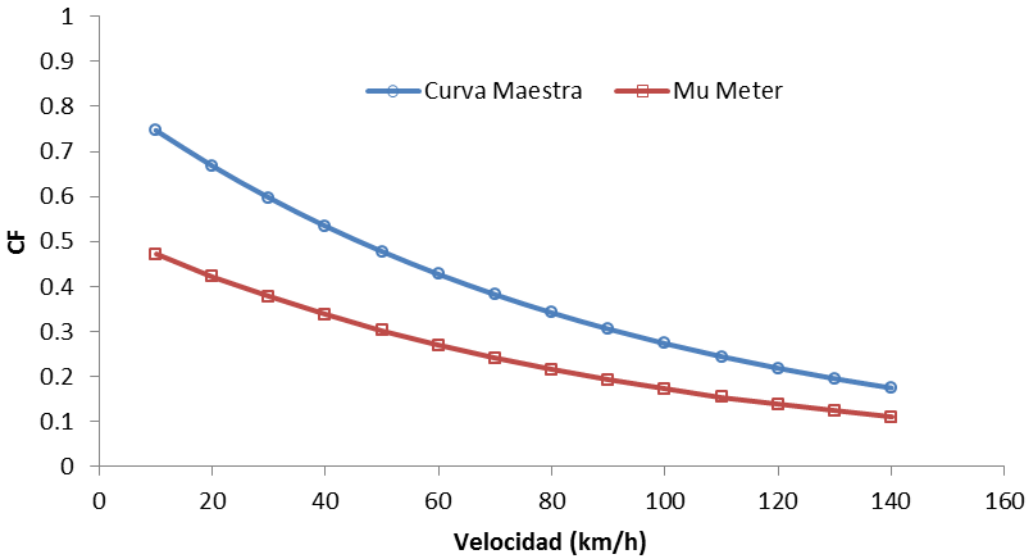

Figura 4.11 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra.

A partir de los datos obtenidos para coeficiente de fricción con la curva maestra y con equipo mu meter se obtiene la relación que se presenta en la Gráfica 4.12, nótese que los coeficientes de la recta de ajuste, corresponden a los valores de A y B buscados; en este caso:

$$A = 0.1728 \text{ y } B = 0.9865$$

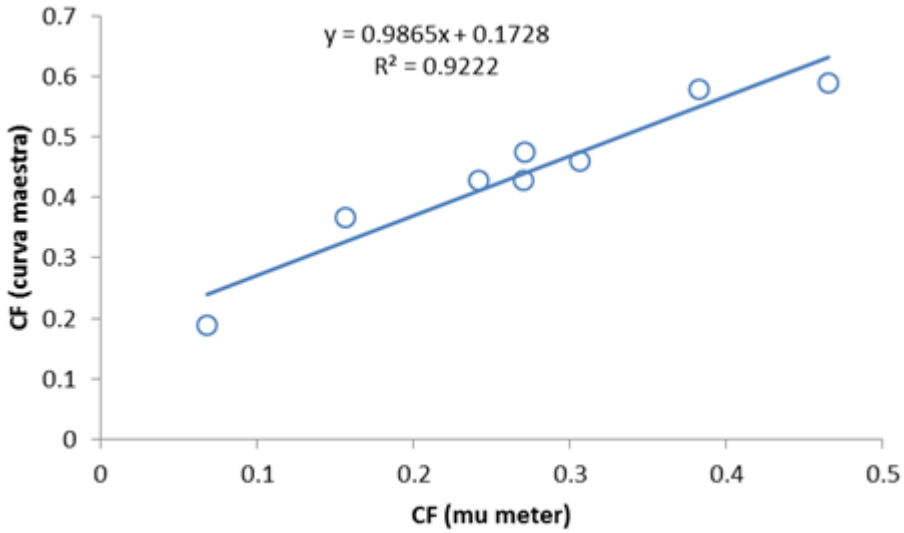

Figura 4.12 Relación entre los valores de CF a 60km/h para mu meter contra curva maestra.

Aplicando los valores A y B así obtenidos al tramo del ejemplo, se tiene la gráfica CF vs velocidad de medición de la fricción (curva maestra obtenida a partir de mu meter como se muestra en la Figura 4.13.

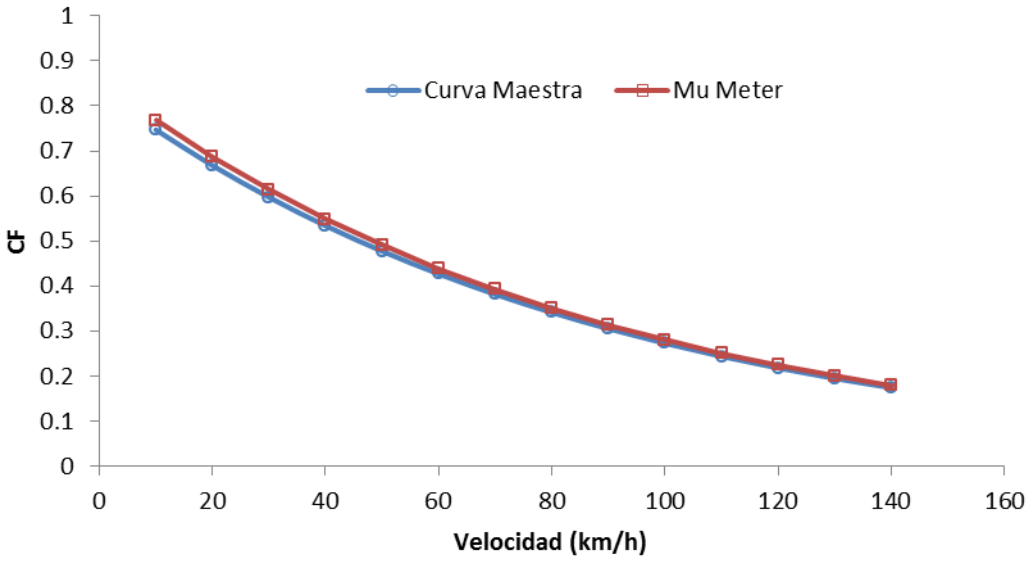

Figura 4.13 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR con mu meter, ajustada con coeficientes A y B propuestos y comparada contra la curva maestra.

En la Figura 4.13 puede observarse una buena aproximación entre las dos curvas, maestra obtenida a partir de metodologías participantes en la armonización y la obtenida para mu meter. El menor grado de ajuste se observó en los tramos 2A y 2B, haciendo una inspección de los tramos de prueba, se detectó que dicho tramo, además de contar con un ancho de carril más pequeño que el resto de los tramos de prueba, tiene vialetas colocadas de manera irregular en el borde de la carpeta, lo que puede producir mediciones erróneas con el mu meter, no así con el péndulo británico dado que éste se ubica de manera puntual y evitando dichos elementos; debido a lo anterior, se eliminaron dichos tramos para la obtención de los parámetros A y B indicados en el presente trabajo.

5 Conclusiones y Recomendaciones

Se presenta aquí una metodología para establecer el modelo del IFI a partir de un equipo para el cual no se cuenta con parámetros de ajuste reportados en el experimento de armonización realizado por PIARC, en donde se establece el modelo del IFI.

Se determinaron curvas maestras para diez tramos de prueba con diferentes características de fricción y macrotextura, los cuales constaban de 200m de longitud, cada uno; lo anterior a partir de mediciones de fricción con péndulo británico y de macrotextura con círculo de arena, debido a que ambas metodologías fueron armonizadas en el experimento citado y por ende, se cuenta con los coeficientes de ajuste reportados en el informe correspondiente editado por la PIARC.

A partir de las curvas de coeficiente de fricción contra velocidad de medición (formato IFI) obtenidas ahora con mu meter, para los mismos tramos de prueba, lo anterior con la finalidad de ajustar estas curvas con las maestras obtenidas con equipos participantes con el experimento, cuyo resultado arroja un valor de A = 0.1728 y B = 0.9865, mismos que pueden aplicarse a las mediciones de fricción determinados con mu meter en nuestra red de carreteras, con la finalidad de obtener el Índice de Fricción Internacional tal como se indica en la literatura.

Al aplicar estos factores a cada uno de los tramos, se observó buena concordancia de las curvas maestras obtenidas con mu meter y péndulo de fricción; para el tramo 2 (A y B), se presentaron dispersiones más importantes, haciendo una inspección de los tramos de prueba, se detectó que dicho tramo, además de contar con un ancho de carril más pequeño que el resto de los tramos de prueba, tiene vialetas colocadas de manera irregular en el borde de la carpeta, lo que puede producir mediciones erróneas con el mu meter, no así con el péndulo británico dado que éste se ubica de manera puntual y evitando dichos elementos; debido a lo anterior, se eliminaron dichos tramos para la obtención de los parámetros A y B indicados en el presente trabajo.

Se recomienda ampliar el experimento a tramos con macrotextura y coeficiente de fricción fuera del rango aquí evaluado, es decir macrotexturas inferiores a 0.3mm y superiores a 1.5mm; asimismo coeficientes de fricción inferiores a 0.20 y superiores a 0.7, determinados con equipo mu meter; lo anterior puede lograrse en colaboración con DGST, y el acervo de mediciones que tiene en las carreteras mexicanas y poder ubicar los tramos con estas características y ampliar el rango de validez de los parámetros aquí obtenidos, así como ajustar dichos valores a las condiciones de nuestros caminos.

Dado que en nuestra red de carreteras la macrotextura se obtiene con equipo de alto rendimiento, y con la finalidad de alcanzar la mejor aproximación al modelo del IFI, se propone utilizar las ecuaciones de ajuste proporcionadas por el IMT, para cada equipo durante su verificación, para ajustar los valores de macrotextura a valores de círculo de arena y posteriormente aplicar los coeficientes IFI para círculo de arena para obtener los valores de FR60 como en el caso de la Tabla 3.1.

Finalmente, y con la finalidad de obtener el IFI a partir de los datos obtenidos para nuestra red de carreteras, se deben aplicar las ecuaciones 2) a 3) ya con los valores de mu meter levantados y considerando que los coeficientes A y B, aquí propuestos, se deben aplicar para los valores de mu meter tal como los entrega el equipo, es decir, en valor decimal.

6 Bibliografía

ASTM E 1960-07 (Reapproved 2011) Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement

ASTM E 303-93 (2013) Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester

E 965-15 Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique

ASTM E 670-09 (2015) Standard Test Method for Testing Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter

Experimento Internacional AIPCR de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento, AIPCR: Comité Técnico AIPCR de Características Superficiales C.1. Publicación AIPCR- 01-04.T-1995.