



NORMATIVA PARA EVALUAR LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS

INVESTIGADOR

ING. FABRICIO LEIVA

Julio 2005

NORMATIVA PARA EVALUAR RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS

1. ANTECEDENTES

1.1 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El movimiento del vehículo es posible mientras las fuerzas resistentes sean iguales o superiores a las fuerzas de arrastre. La Resistencia al Deslizamiento que presenta una superficie de pavimento está determinada por el valor efectivo del roce expresado mediante el coeficiente μ .

El vehículo se considera como un cuerpo rígido y se asume que las fuerzas resultantes actúan en el centro de gravedad.

Las fuerzas de fricción dependen del coeficiente de fricción y de la carga normal sobre la trayectoria de contacto entre neumático y superficie. Para la distribución de fuerzas en la conducción dinámica relativa para el vehículo como masa puntual, se presenta la siguiente relación:

$$F = \mu \cdot Q$$

F: fuerza de fricción.

Q: peso del vehículo.

μ : coeficiente de fricción dinámico.

El coeficiente de fricción varía por la influencia de elementos físicos como: presión de aire de los neumáticos, composición de los neumáticos, tipo y condiciones de la superficie del pavimento, presencia o ausencia de humedad, fango, nieve o hielo.

Durante el movimiento del vehículo, diferentes fuerzas son transmitidas entre los neumáticos y el pavimento, las cuales actúan normal a la superficie (fuerza vertical) como también paralelas a ella (fuerza horizontal).

Las fuerzas horizontales pueden ser proyectadas en la dirección tangencial, que es paralela a la trayectoria del vehículo, y en la dirección radial, que es normal a la trayectoria del vehículo. Esto se puede apreciar de mejor manera en curvas, ya que la fuerza de rozamiento compensa el efecto que genera la fuerza centrífuga, lo que impide que el móvil pierda el control y salga expulsado en forma tangencial al radio de la curva, por lo que la fuerza de roce se desarrolla en una dirección longitudinal y en otra transversal al sentido de desplazamiento. En una curva el coeficiente de roce principal corresponde al roce transversal.

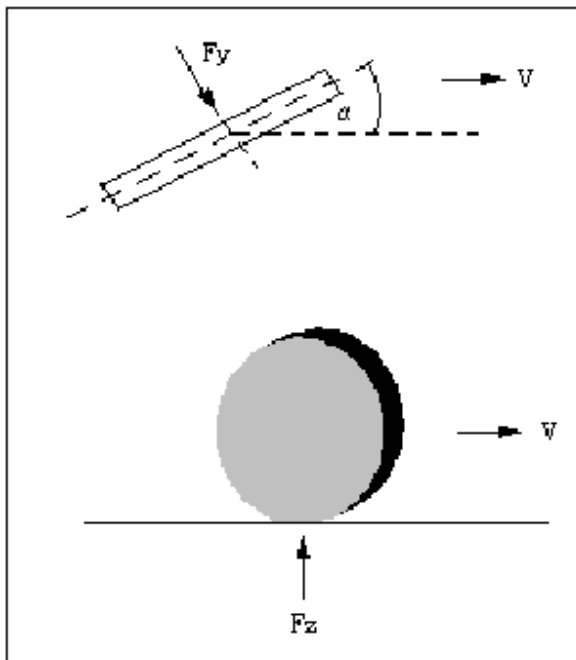
Cada neumático contribuye a la transmisión de fuerzas mientras el vehículo está en movimiento. Para el modelo de masa puntual se debe considerar que:

- La masa del vehículo está concentrada en el centro de gravedad.
- Todas las fuerzas actúan en el centro de gravedad.
- El centro de gravedad hipotético del vehículo se proyecta sobre la superficie.
- El área de contacto entre neumáticos y superficie está generalizada y simplificada.
- El movimiento tridimensional es reducido al movimiento en dos dimensiones, las cuales son analizadas en forma separada.

1.2 TIPOS DE COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

a) Coeficiente de Fricción Transversal.

Es la relación entre la reacción (F_y) Transversal a la rueda situada en un plano perpendicular al plano de la misma y el peso que actúa sobre ella (F_z).



$$f_t = \frac{F_y}{F_z}$$

Figura 1.1: Coeficiente de Fricción Transversal.

b) Coeficiente de Fricción Longitudinal.

Es la relación entre la reacción (F_x) Tangencial a la rueda situada en un plano vertical al plano de la misma y el peso que actúa sobre ella (F_z).

$$f_l = \frac{F_x}{F_z}$$

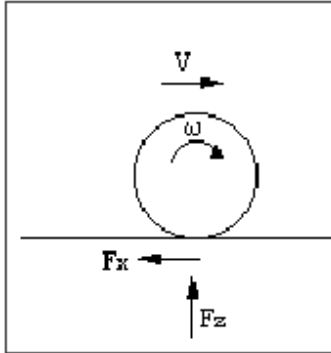


Figura 1.2: Coeficiente de Fricción longitudinal.

1.3 COMPONENTES DE LA FRICCIÓN.

a) Adhesión.

La adhesión es el resultado de la resistencia al corte provisto por la interacción molecular de la goma del neumático y de los áridos. Su magnitud es determinada por la naturaleza de los dos materiales en contacto (Figura 1.3).

b) Deformación o histéresis.

La deformación o histéresis de origen viscoelástico es causada por pérdida de amortiguamiento en la goma, cuando ésta es desgastada sobre y alrededor de las partículas minerales (Figura 1.3).

$$F = F_a + F_h$$

F: fuerza de roce total.

Fa: Fuerza de roce por adhesión.

Fh: Fuerza de roce por histéresis de origen viscoelástico.

En los pavimentos mojados, la película de agua que se interpone entre las dos superficies de contacto impide el contacto molecular, anulándose la componente de adherencia si la película de agua no es evacuada con rapidez. Esta pérdida de roce por adherencia en pavimentos mojados se traduce en un incremento del porcentaje de accidentes por deslizamiento.

Sobre superficies secas, el roce del neumático/superficie producido por adherencia predomina sobre el roce producido por deformación, siendo proporcional al área de contacto neumático/pavimento, disminuyendo al aumentar la temperatura y variando con la velocidad.

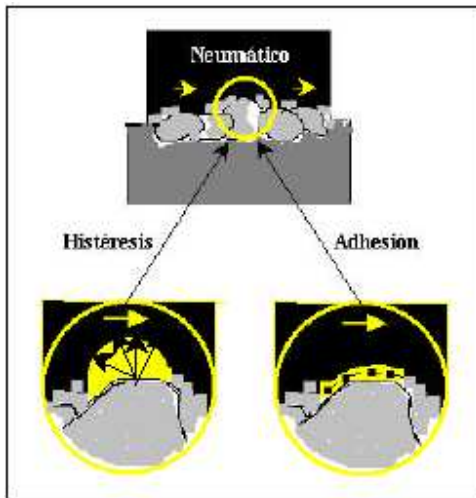


Figura 1.3: Fricción de la Goma del Neumático (adhesión e histéresis).

1.4 FACTORES QUE AFECTAN EL VALOR DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

El coeficiente de fricción entre una carpeta de rodado y el neumático del vehículo está condicionado por: las características del pavimento (tipo, composición y adherencia), la densidad del tránsito, condiciones del lugar, contaminación en la superficie (aceite, polvo, goma, etc.), grado de humedad en la superficie y temperatura.

a) Adherencia.

Se relaciona con la estructura geométrica de la superficie de rodado formada por el agregado y ligante. Las propiedades de la mezcla dependen de la naturaleza y granulometría de los agregados, del ligante utilizado y de su composición. La adherencia que presenta un pavimento (micro y macrotextura) expresa la buena o mala fricción y el grado de drenaje que posee. (Figura 1.4).

- **Macrotextura:** Corresponde a los intersticios generados debido a la distribución de agregado en la superficie. Afecta la capacidad de drenaje que tiene la superficie del pavimento para despejar el agua de la superficie, lo cual permite un mejor contacto entre el neumático y la superficie de rodado. Presenta una longitud de onda (λ) de 0.5-50 [mm] y una amplitud (A) de 0.01-20 [mm]. (Figura 1.5).

- **Microtextura:** Influye en la fricción entre el neumático y la superficie de rodado. Es la característica propia del agregado expuesto. Presenta una longitud de onda (λ) de 0-0.5 [mm] y una amplitud (A) de 0.01-0.5 [mm]. (Figura 1.5).

b) Presencia de agua en la superficie.

El espesor de la película de agua sobre la calzada en ocasiones produce pérdida de control, lo cual es conocido como hidroplaneo.





	Superficie	Clases de Textura	
		Macro	Micro
A		Gruesa	Áspera
B		Gruesa	Pulida
C		Fina	Áspera
D		Fina	Pulida

Figura 1.4: Escala de textura.

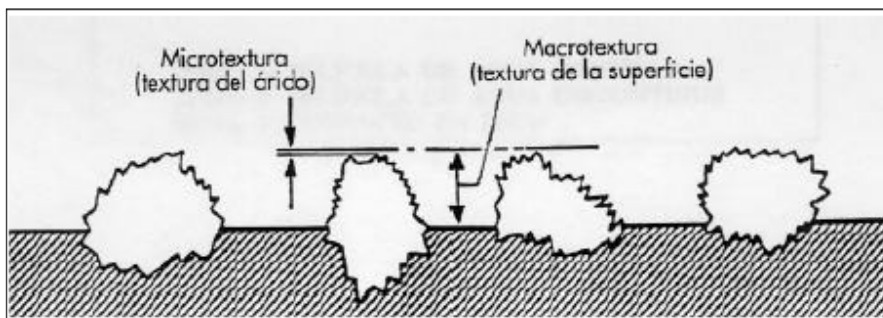
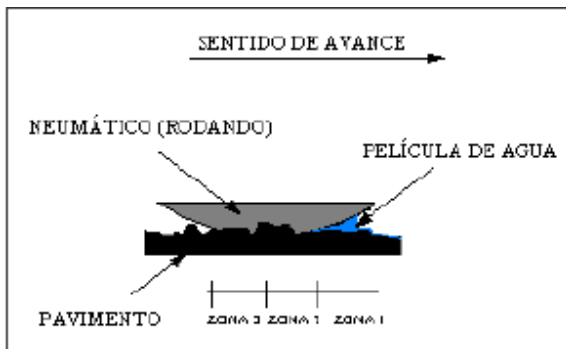


Figura 1.5: Esquema de Macrotextura y Microtextura.

El hidroplaneo (aquaplaning) se produce cuando el espesor de la película es apreciable y el vehículo viaja a alta velocidad y en texturas muy finas que no dan tiempo de evacuar el agua entre el neumático y el pavimento. Los neumáticos pierden contacto con la superficie del pavimento. Se puede evitar a través de una macrotextura adecuada de la carpeta de rodado, de tal forma que se produzca un contacto directo entre neumático y pavimento.

En la Figura 1.6 se presentan esquemáticamente las condiciones de contacto existentes entre el neumático y el pavimento mojado. La interacción entre ambos puede dividirse en tres zonas. En la primera, existe una película de agua continua que impide el contacto. En la segunda zona, se ha logrado evacuar la mayor parte del agua, quedando una película discontinua en algunas asperezas del pavimento. En la tercera zona, se ha desplazado la película de agua y existe un contacto prácticamente en seco.

Una macrotextura gruesa ayuda a una mayor capacidad de evacuación del agua. Al aumentar la velocidad del vehículo o espesor de la película de agua, se reduce la zona 3, aumenta la zona 1 y se disminuye la adherencia.



Zona 1: película de agua continua.
 Zona 2: película de agua discontinua.
 Zona 3: contacto en seco.

Figura 1.6: Zonas de interacción neumático – pavimento.

c) Naturaleza del agregado que constituye la naturaleza de la calzada.

Las características de la textura superficial de una carpeta de rodado se van modificando a medida que se produce el paso vehicular, generando desgaste y pulimento, lo que afecta directamente a la adherencia entre neumático y superficie de rodado. Esto depende de la naturaleza y forma del árido, influyendo en su vida útil y en la seguridad de la conducción.

d) Naturaleza del ligante utilizado. (cemento, asfalto)

El exceso del ligante es nocivo y disminuye el roce porque produce macrotexturas finas y aparecen capas muy resbaladizas y peligrosas en presencia de líquido.

e) Estacionalidad.

El coeficiente de fricción para una misma vía cambia dependiendo del período en que se realice la medición, el coeficiente de rozamiento medido en verano es inferior al registrado en invierno, ya que el pavimento es lavado con las precipitaciones.

f) Presión de inflado del neumático.

Mientras mayor sea la presión de inflado del neumático, menor será el área de contacto neumático-pavimento, por lo tanto, la fricción entre ambas superficies disminuye. (Se puede demostrar experimentalmente que este efecto es de segundo orden).

g) Velocidad del vehículo.

Actúa de dos formas que se superponen:

- 1) En presencia de agua: A medida que la velocidad aumenta existe la tendencia a la disminución del rozamiento, esta disminución es tanto menor cuanto mayor es la evacuación del agua que proporciona la macrotextura.
- 2) Por efecto dinámico vertical: La fuerza de contacto neumático-pavimento aumenta y disminuye con respecto al valor estático al disminuir o aumentar la velocidad, variando la adherencia, por tanto es función de la rugosidad.

h) Importancia del tráfico.

Esto va unido con la categoría de la vía. El volumen y tipo de tráfico que circule influirá en el desgaste del pavimento. Los excesos de carga o presiones de inflado, causan esfuerzos que exceden la resistencia al corte de los materiales, causando una deformación permanente e irrecuperable de las capas del pavimento, la cual se manifiesta en la superficie como un canal longitudinal bajo la huella descrita por las ruedas del vehículo, fenómeno conocido como ahuellamiento.

El impacto e importancia que tiene el ahuellamiento está determinado fundamentalmente por la influencia que tiene en aspectos tales como las fuerzas dinámicas en un vehículo durante su recorrido y la seguridad (específicamente en lo relacionado al riesgo que genera el fenómeno de hidroplaneo).

Otros aspectos que contribuyen al ahuellamiento son: el exceso de contenido de cemento asfáltico, el exceso de agregados finos, los altos porcentajes de arena natural, el exceso de contenido de humedad en la mezcla de material granular y suelo.

2. INDICE INTERNACIONAL DE FRICCIÓN IFI

2.1 INTRODUCCIÓN

El Índice de Fricción Internacional, designado como **IFI**, es el segundo de una, probablemente, larga serie de indicadores internacionales que definen el estado de una carretera. El desarrollo de indicadores internacionales comenzó con el **IRI** Índice de Regularidad Internacional. El uso de este índice presenta la gran ventaja de permitir la comparación entre los pavimentos empleados en cualquier país del mundo y, por tanto, el intercambio de información entre los profesionales y las Administraciones. Así hablar de un pavimento de IFI (0,35, 120) significa que el pavimento, esté donde esté, presenta las mismas características de adherencia y textura, con independencia del tipo de pavimento que sea y del equipo de medida que se haya empleado.

2.2 CONCEPTO Y DEFINICIÓN DEL IFI

El IFI se puede describir como una escala de referencia, de aplicación internacional, de la fricción y de la textura de un pavimento. La textura es la geometría más "fina" del perfil longitudinal de la carretera. Según la definición de la AIPCR corresponde a las irregularidades cuya longitud de onda está entre 0 y 0,5 m. A estas longitudes de onda les corresponden amplitudes que suelen variar entre 0 y 20 mm.

Estudios realizados han demostrado que, para interpretar mejor los fenómenos que suceden en el contacto neumático-pavimento asociados a situaciones de riesgo durante las operaciones de frenado en pavimentos mojados, es conveniente subdividir la textura en tres clases: megatextura, macrotextura y microtextura, definidas en la tabla adjunta.

Tabla 2.1 Diferencias entre las clases de textura

	Longitud de Onda, λ	Amplitud, A
MEGATEXTURA	50 -500 mm	0,1 - 50 mm
MACROTEXTURA	0,5 - 50 mm	0,01- 20 mm
MICROTEXTURA	0 - 0,5 mm	0,001- 0,5 mm

Está comprobado que las necesidades de adherencia y de capacidad de evacuación de agua en los “huecos” del neumático y del pavimento se pueden razonablemente asegurar con pavimentos que tengan determinados valores de microtextura y de macrotextura. Es decir, la microtextura influye en la fricción y la macrotextura en la capacidad de evacuar agua rápidamente, impidiendo o dificultando los fenómenos de hidropneumático, lo que también ayuda a mejorar la fricción.

Tradicionalmente se ha venido caracterizando el pavimento por el valor de un coeficiente de rozamiento, determinado mediante equipos y ensayos más o menos modernos, y mejor o peor adaptados a las condiciones actuales de la circulación y de los pavimentos.

La materialización de representar en un solo índice las características relacionadas con la seguridad vial en condiciones de frenado se ha conseguido realizando el Experimento Internacional (Experimento Internacional AIPCR de Comparación y Armonización de las medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento. Publicación AIPCR- 01-04.T-1995). Las conclusiones del Experimento han probado la necesidad de representar ese índice, el IFI, por dos números procedentes de dos medidas, una de fricción y otra de macrotextura.

Por tanto, el IFI viene indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma, el primero representa la fricción y el segundo la macrotextura. El primero es un número adimensional y el segundo un número positivo sin límites determinados y unidades de velocidad (km/h). El valor cero de fricción indica deslizamiento perfecto y el valor uno adherencia. No es posible, por el momento, describir con una relación sencilla como la anterior, el segundo número que compone el IFI.

La explicación del IFI, tal y como se deduce del Informe del Experimento es la siguiente:

El Índice de Fricción Internacional es una escala de referencia basada en el Modelo AIPCR (que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento), modelo que sirve para estimar la constante de referencia de velocidad (S_p) y la de fricción a 60 km/h (F_{60}) de un pavimento. El par de valores (F_{60} y S_p) expresan el IFI de un pavimento y permiten calcular el valor de fricción, $F(S)$, a cualquier velocidad de deslizamiento S mediante la ecuación siguiente:

$$F(S) = F60 \cdot e^{\frac{(60-S)}{S_p}}$$

Para obtener el IFI se precisa en primer lugar realizar (con cualquier equipo o técnica, homologada u homologable a partir de los criterios establecidos en el Experimento Internacional), dos tipos de medidas sobre el pavimento: una de fricción y otra de textura. Una vez obtenidas las medidas de los equipos se expresan en formato IFI de acuerdo con lo que sigue:

El Índice de Fricción Internacional (IFI) se basa en el **MODELO AIPCR** que relaciona la fricción de un pavimento con la velocidad de deslizamiento de un vehículo sobre él. El modelo es de tipo exponencial y se describe en función de una constante (FR60) referida a la velocidad de deslizamiento de 60 km/h. La ecuación queda de la forma siguiente:

$$FR(S) = FR60 \cdot e^{\frac{(60-S)}{S_p}}$$

La ecuación anterior permite convertir la medida de fricción, FRS, realizada a cualquier velocidad a la medida de la fricción a 60 km/h, FR60. La Figura 1 representa de forma genérica el modelo AIPCR.

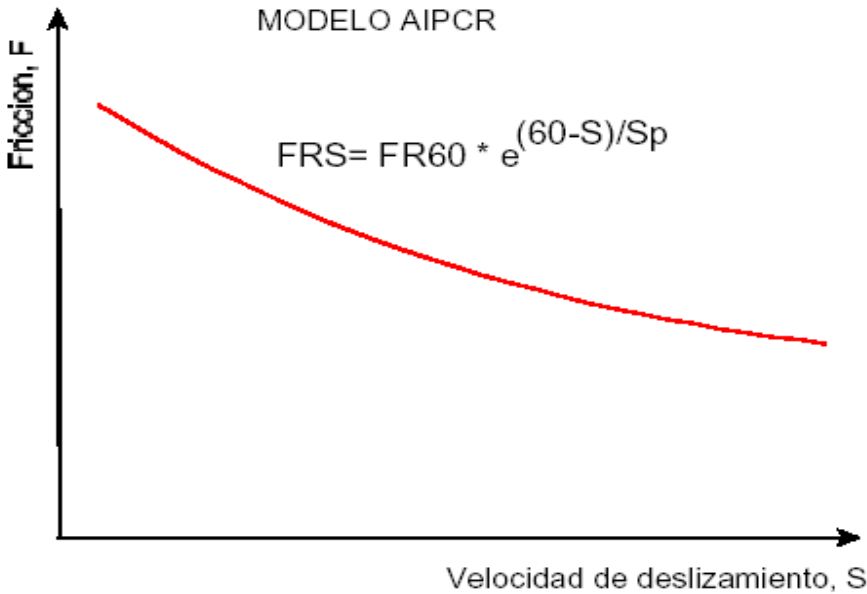


Figura 1. Curva Fricción - Deslizamiento

La Figura 1 representa la curva de “fricción - deslizamiento” de un equipo determinado. Por tanto, si ese pavimento se ensayara con otro equipo se obtendría otra curva de fricción - deslizamiento, que podría estar próxima o alejada de la curva del primer equipo. Su campo de aplicación estaría restringido a la utilización siempre del mismo equipo y a la “experiencia” acumulada en la interpretación de sus datos.

Para mejorar esta situación y armonizar las medidas de los equipos, se llevó a cabo el Experimento Internacional, y con sus resultados se ha establecido el procedimiento que permite ajustar las curvas de cada equipo alrededor de un a *CURVA DE REFERENCIA*, GF(S), “GOLDEN VALUES” que representa la función fricción - deslizamiento “real” de un pavimento (Figura 2).

$$GF(S) = GF60 \cdot e^{\frac{(60-S)}{GS}}$$

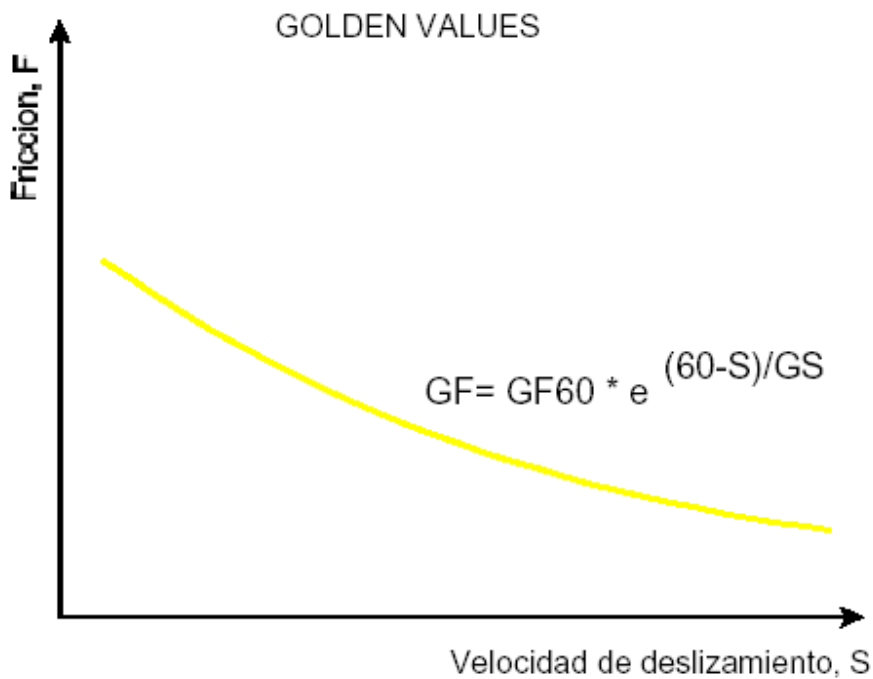


Figura 2. Curva de Referencia Verdadera

El proceso de armonización permite establecer para cada equipo la **FRICCIÓN DE REFERENCIA ESTIMADA, F60**, que presumiblemente estará cerca del valor “real” **GF60**. Lo estará, sin duda, sí el procedimiento de armonización ha sido bueno.

Durante la elaboración del modelo y a partir de los datos del Experimento se ha comprobado que la constante S_p de la velocidad de referencia se podía determinar mediante una regresión lineal con una medida de la macrotextura, Tx:

$$S_p = a + b \cdot Tx$$

Por definición la pareja de valores (F_{60} , S_p) se designa como el **IFI** de un pavimento. Su conocimiento permite dibujar la **curva de referencia estimada de fricción – velocidad de deslizamiento del pavimento**. (Figura 3)

$$F(S) = F_{60} \cdot e^{\frac{(60-S)}{S_p}}$$

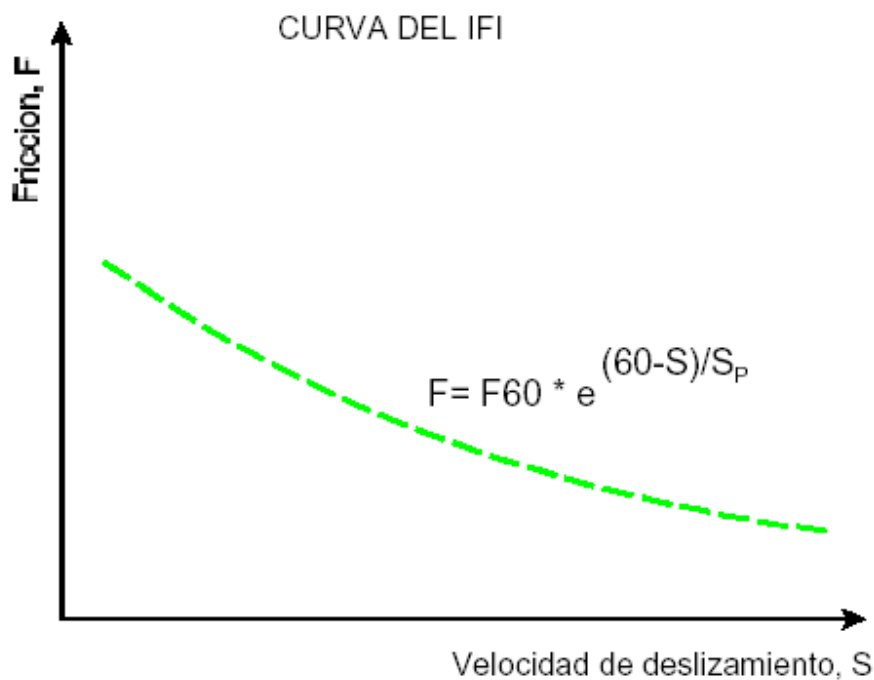


Figura 3. Curva de Referencia Estimada

Para la estimación del valor FR60 se procede de la forma siguiente:

- Se establece el tipo de equipo empleado:
- Se determina S

S = Velocidad del equipo durante el ensayo. Para equipos con rueda bloqueada.
 S = Velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el tanto por uno de deslizamiento. Para equipos con rueda parcialmente bloqueada (Griptester).
 S = Velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el seno del ángulo de deriva. Para equipos con rueda oblicua (SCRIM).

c) Se determina el valor de la constante, FR60 a partir del valor de la medida realizada, FRS mediante la expresión:

$$FR60 = FRS * e^{\frac{(S-60)}{S_p}}$$

El valor F60 se obtiene el valor de la expresión:

$$F60 = A + B * FR60$$

El IFI obtenido es: (F60, Sp).

El proceso completo de cálculo se representa en la Figura 4.

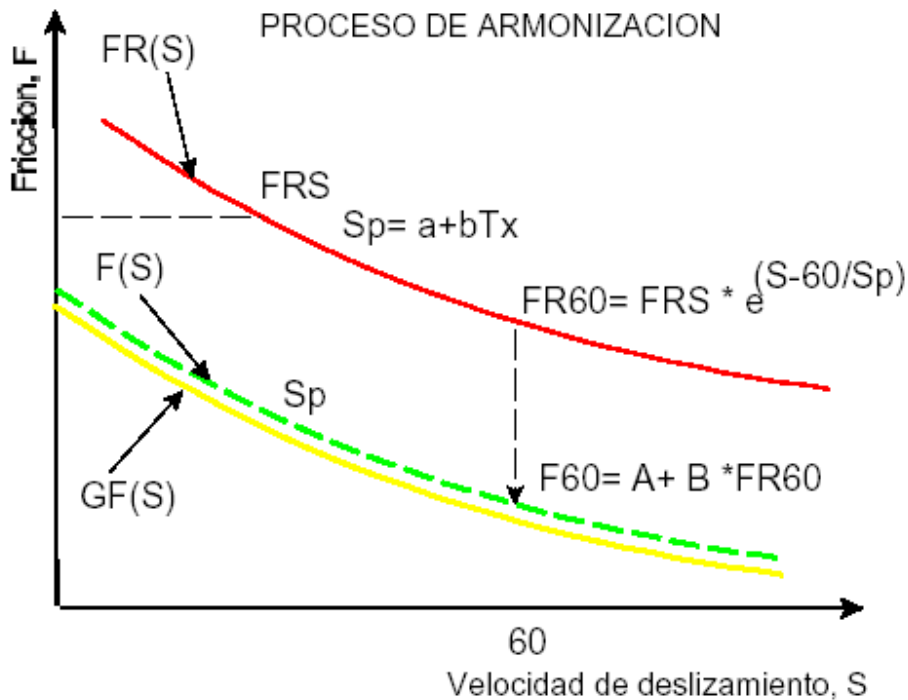


Figura 4. Obtención Curva Fricción – Deslizamiento

2.3 DIFERENCIAS Y SEMEJANZAS CON OTROS ÍNDICES

Actualmente las Administraciones de carreteras y aeropuertos vienen utilizando una serie de índices muy diversos, asociados, y exclusivos, al equipo de medida empleado. Uno de los más conocidos es el CRT (Coeficiente de Rozamiento Transversal) obtenido por el equipo SCRIM (Sideway Coefficient Routine Inventory Machine) de origen británico utilizado en bastante países europeos (Reino Unido, Francia, Italia, España, etc); otro índice de amplio uso en USA y en pistas de aeropuertos es el SN (Skid Number).

Estos índices representan el valor de la fricción de un pavimento en un ensayo de rozamiento realizado en determinadas condiciones. Por tanto no es posible establecer, salvo con una investigación específica, la correspondencia entre un valor de SN y un valor de CRT.

En cambio, cuando se determine un valor de IFI se va a tener una idea muy aproximada de las capacidades de fricción de pavimentos diferentes, medidos en circunstancias diversas y con equipos distintos.

Por otra parte, aunque de forma separada, el IFI integra las dos medidas de textura (una de microtextura y otra de macrotextura) necesarias para tener una idea clara de la capacidad de un pavimento de ofrecer una superficie segura en condiciones adversas.

Interesa señalar que el riesgo potencial de hidroplaneo está fundamentalmente asociado (junto a las características geométricas y de velocidad de circulación) con la macrotextura, es decir, con el segundo número del IFI.

En la norma ASTM E 1960 se establece la práctica para el cálculo del IFI para diferentes dispositivos de medición de fricción. Para el cálculo del valor S_p se establecen constantes dependiendo de la metodología de medición de la textura como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Valores de constantes a y b para el cálculo de S_p

T_x	a	b
MPD ASTM E 1845	14.2	89.7
MTD ASTM E 965	-11.6	113.6

MPD: Profundidad media del perfil, utiliza un perfilómetro de alta resolución

MTD: Profundidad media de textura, metodología de la mancha de arena.

De igual forma se cuenta con valores de las constantes A y B para el cálculo de F60, para diferentes dispositivos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.3 valores de constantes A y B para cálculo de F60

Dispositivo	S (km/h)	A	B
Griptester (UK)	9.4	0.082	0.910
SCRIM (UK)	17.1	0.033	0.872
Péndulo Ingles	10	0.056	0.008

3. COMPARACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE FRICCIÓN

3.1 EQUIPO DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Existe una cantidad considerable de equipos que miden el coeficiente de fricción, los cuales tienen diversos principios de funcionamiento, el tipo de medición puede ser continua o puntual.

A continuación se describirán equipos según el principio de funcionamiento, para entender mejor el modo de operación.

Equipos de Rueda Bloqueada.

Estos equipos producen un bloqueo de sus neumáticos del 100%, la velocidad relativa entre el neumático y el pavimento es igual a la del vehículo. Al aplicar el freno, se mide la fuerza y se promedia durante un segundo con la rueda completamente bloqueada.

Una variante del caso anterior es un bloqueo variable, en el cual la fricción registrada se obtiene en función del grado de deslizamiento, desde la rodadura libre (deslizamiento del 0%) hasta el bloqueo total (deslizamiento del 100%).

Los equipos de rueda bloqueada, generalmente poseen un sistema de riego para mojar los pavimentos, ya que se requiere de una película de 0,5 [mm] de espesor nominal para realizar el ensayo.

Equipos de Rueda Oblicua.

En estos equipos la rueda forma un ángulo respecto al sentido del movimiento del vehículo, no existiendo ningún mecanismo de frenado. Se mide el esfuerzo lateral, perpendicular al plano de rotación.

El SCRIM, de origen británico, es el equipo de este tipo más utilizado. Provisto de una sola rueda, funciona con un ángulo de deriva del neumático de 20° y está provisto de un sistema de riego autónomo, capaz de proporcionar una lámina de agua de 1 [mm] nominal.

El MuMeter, también de origen británico, tiene dos ruedas, cada una con un ángulo divergente de deriva de 7.5° . Este equipo es utilizado principalmente para evaluar las pistas de aeropuertos.

El Odoliographe, utilizado en Bélgica, no lleva un sistema de riego y tiene que seguir a un camión cisterna que va mojando el pavimento. La velocidad relativa de la rueda de estos equipos respecto al pavimento es del orden de la velocidad del vehículo por el seno del ángulo de deriva de las ruedas, por lo que la velocidad de giro de la rueda de prueba es bastante pequeña aunque la velocidad del vehículo sea alta.

Equipos de Rueda Parcialmente Bloqueada. (con grado de deslizamiento fijo).

La ventaja de la medida con la rueda parcialmente bloqueada se basa en que se puede realizar un registro continuo de la fricción, siempre y cuando se escoja una relación de deslizamiento pequeña.

Los equipos de rueda bloqueada no pueden hacer este tipo de registros ya que el neumático de ensayo se desgasta muy rápidamente. Los equipos de rueda parcialmente bloqueada suelen operar con un grado de deslizamiento del 10% al 20%. Miden el coeficiente de fricción a baja velocidad, ya que la velocidad de deslizamiento es el producto de la velocidad por el tanto por uno de deslizamiento.

Equipos de Rueda Parcialmente Bloqueada. (con grado de deslizamiento variable).

El equipo más representativo de este tipo es el NORSEMETER, uno de los pocos diseñado para medir a cualquier grado de deslizamiento, tanto para hacer un barrido dentro de una escala de valores, como para buscar el coeficiente de fricción máximo mediante un sistema de regulación.

Equipos Estacionarios.

El principal representante de esta categoría corresponda al Péndulo Británico, uno de los primeros equipos que permitió obtener valores directamente relacionados con el efecto de la fricción, midiendo la microtextura.

El aparato usado para este efecto consiste en un brazo pendular con un patín de caucho en un extremo que se deja caer para que resbale sobre la superficie a medir. La medida de la resistencia al deslizamiento se basa en la pérdida de energía del patín de caucho al resbalar por la superficie.

Con respecto a los diferentes tipos y marcas de equipos para medición de resistencia al deslizamiento (coeficiente de fricción), se puede mostrar:

Para efecto del Experimento Internacional de Comparación y Armonización, los equipos utilizados para evaluar los 54 tramos de prueba fueron clasificados de acuerdo a lo que se indica en la Tabla 3.1; todos estiman indirectamente la fricción a partir de la resistencia al deslizamiento de una rueda que al momento de la medición se bloquea, total ó parcialmente, y que se desplaza a un cierto ángulo con respecto a la trayectoria del vehículo. Los equipos de fricción fueron ensayados a velocidades de 30, 60 y 90 Km/Hr; y en cada prueba se realizaron dos repeticiones para cada velocidad.

Algunos de los equipos para las pruebas de medición de la macrotextura se muestran en la Tabla 3.2:

La Tabla 3.3 adjunta presenta el resumen general de características para 5 dispositivos para la medición de resistencia al deslizamiento, de uso en pavimentos de carretera, de los cuales se pudo obtener información.

La Tabla 3.4 presenta el resumen general de fortalezas y debilidades para cada equipo específico.

Tabla 3.1. Clasificación de los equipos según la medición de fricción

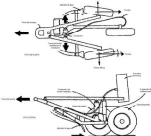

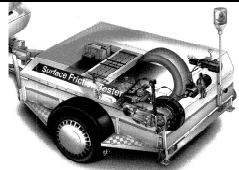
<i>Para Fricción</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ejemplos:</i>
Con ruedas oblicuas, en inglés se usa el término <i>Side Force</i> .	Las ruedas giran libremente en un cierto ángulo de esviaje con respecto a la dirección de la trayectoria del vehículo.	 <p>Nombre comercial : <i>Mu-Meter</i></p>
Con una rueda parcialmente bloqueada, en inglés se usa el término <i>Fixed Slip</i>	La rueda gira parcialmente bloqueada en la dirección de la trayectoria del vehículo.	 <p>Nombre comercial : <i>Griptester</i></p>
Con una rueda bloqueada, en inglés se usa el término <i>Locked Wheel</i>	La rueda se bloquea y se desplaza en la misma dirección de la trayectoria del vehículo.	 <p>Nombre comercial : <i>Surface Friction Tester</i></p>

Tabla 3.2. Clasificación de los equipos según la medición de textura.




<i>Para Textura</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ejemplos:</i>
Equipos Estacionarios	Con velocidad de deslizamiento nula	 <p>Nombre comercial: <i>Péndulo de Fricción Británico</i></p>
Equipos Móviles a velocidad de crucero	Con velocidad de deslizamiento desde 10 kph y hasta 60 kph	 <p>Nombre comercial: <i>Norsemeter (fricción y textura)</i></p>
Equipos Móviles de gran velocidad	Con velocidad arriba de los 60 kph	 <p>Nombre comercial: <i>Selcom Road Laser</i></p>

Tabla 3.3: Características de equipos para medición de resistencia al deslizamiento.

Tipo de equipo	Fabricante y modelo	Norma de ensayo	Capacidad del tanque con agua y de medición	Otras características
Fixed slip-tester	KJLaw / Dynatest 6815H	Norma ASTM en proceso de redacción. Se usa activamente en el estado de Arizona; anteriormente se aplicó mucho en pavimentos de aeropuerto (modelo 6815).	600 litros, aproximadamente 12000 m de muestreo continuo	<u>Permite mediciones continuas</u> ; de particular importancia en zonas de accidentes. La versión 6815H mide el coeficiente de fricción sobre una de las huellas. Se tiene el criterio de especificación de Arizona (mínimo número de fricción de 43). <u>El equipo simula mejor los sistemas de frenado ABS.</u>
Fixed slip-tester británico	Griptester MK1 / Mastraad	Se ha aplicado mucho en aeropuertos normales y de transbordadores espaciales (NASA). La llanta de ensayo sigue especificaciones ASTM.	500 litros, aproximadamente 30000 m de muestreo continuo	<u>Permite mediciones continuas</u> ; de particular importancia en zonas de accidentes. <u>Se puede medir el gripnumber en cualquier posición de interés sobre la calzada.</u> No requiere vehículo dedicado. Es un dispositivo más sencillo de operar y mantener.
Locked-wheel tester. De uso generalizado en EUA, por muchos departamentos estatales de transportes.	International Cybernetics SFT 5041	<u>Norma ASTM E274.</u>	Entre 1000 y 1400 litros.	Las mediciones abarcan longitudes de frenado de 25 m, ocupándose distancias entre mediciones de 35 m, para estabilización del vehículo. <u>Se mide el coeficiente de fricción sobre una de las huellas (corresponde a una llanta estandarizada de dimensiones reales).</u>

Tabla 3.3 (continuación): Características de equipos para medición de resistencia al deslizamiento.

Tipo de equipo	Fabricante y modelo	Norma de ensayo	Capacidad del tanque con agua y de medición	Otras características
Dual locked wheel. Dual wheel / dual track.	International Cybernetics SFT 5042	<u>Norma ASTM E274.</u>	Entre 1000 y 1400 litros.	Las mediciones abarcan longitudes de frenado de 25 m, ocupándose distancias entre mediciones de 35 m, para estabilización del vehículo. <u>Se puede medir el coeficiente de fricción sobre las dos huellas,</u> aunque solamente una a la vez (corresponde a una llanta estandarizada de dimensiones reales).
Locked-wheel tester. De uso generalizado en EUA, por muchos departamentos estatales de transportes.	KJLaw / Dynatest 1295	<u>Norma ASTM E274.</u>	1200 litros, aproximadamente 170 puntos de ensayo a 64 kph, aproximadamente 12200 m de pavimento.	Las mediciones abarcan longitudes de frenado de 25 m, ocupándose distancias entre mediciones de 35 m, para estabilización del vehículo. <u>Se mide el coeficiente de fricción sobre una de las huellas (corresponde a una llanta estandarizada de dimensiones reales).</u>

Tabla 3.4: Comparación de fortalezas y debilidades por tipo de equipo.

Equipo	Fortalezas	Debilidades
Fixed slip-tester de Dynatest	<ul style="list-style-type: none"> • Medición continua. • Correlaciona bien con resistencia a la fricción para sistema de frenado ABS. • Tamaño más pequeño. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se usa una llanta “normal” (la zona de análisis es más pequeña que la huella). • Aún no hay una norma ASTM definida.
Fixed slip-tester británico (Griptester)	<ul style="list-style-type: none"> • Medición continua. • Fácil para dar mantenimiento. • Sistema más sencillo. • Permite muestrear cualquier posición de interés sobre la calzada. • Precio mucho menor que los restantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se usa una llanta “normal” (la zona de análisis es más pequeña que la huella). • Aún no se tiene certeza de la existencia de una norma de ensayo.
Single locked-wheel	<ul style="list-style-type: none"> • Mide el coeficiente de fricción en el área de huella (llanta estándar). • Sigue un procedimiento ASTM. • Más usado en pavimentos, en EUA. 	<ul style="list-style-type: none"> • Luego de una medición no puede tomarse una segunda en longitudes aproximadas de 35 m. • Equipo grande (vehículo y carreta).
Double locked-wheel	<ul style="list-style-type: none"> • Mide el coeficiente de fricción en el área de huella (llanta estándar). • Sigue un procedimiento ASTM. • Más usado en pavimentos, en EUA. • Puede medir el coeficiente de fricción en las dos huellas de un carril (no simultáneamente). 	<ul style="list-style-type: none"> • Luego de una medición no puede tomarse una segunda en longitudes aproximadas de 35 m. • Equipo grande (vehículo y carreta).

3.2 CORRELACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE FRICCIÓN

Existen varias correlaciones entre los dispositivos que tiene mayor uso en el área de carreteras, como son: el Griptester, el SCRIM y el Péndulo Ingles.

El valor de fricción obtenido mediante el SCRIM se conoce como el Coeficiente de Fricción Transversal (CFT), el valor obtenido al utilizar el Griptester se conoce como Grip Number (GN) y al utilizar el Péndulo Ingles se obtiene el coeficiente de pulimento (PSV).

Algunas de las correlaciones que se han encontrado entre estos dispositivos de presentan a continuación:

$$CFT = 0.789 * GN - 0.049$$

$$CFT_{ESC} = 0.42 * GN + 0.20$$

$$CFT_{ESC} = 0.0071 * PSV + 0.033$$

$$GN = 0.012 * PSV - 0.08$$

$$GNE = 0.00867BPN - 0.04348Tx^{-1.29452} - 0.00032BPNTx$$
 Textura medida con círculo de arena

$$GNE = 0.00867BPN - 0.04348Tx^{-1.29452} - 0.00032BPNTx$$
 Textura medida con perfilómetro

Donde:

CFT_{ESC} : Es el coeficiente de equilibrio SCRIM, utilizado para a partir de las condiciones de ficción a lo largo del año.

GN: Grip Number

GNE : Grip Number Equivalente

BPN y PSV: es el valor de fricción medido con el péndulo de fricción.

Tx: profundidad de textura medida en mm.

En un estudio presentado en 5to simposio de las características superficiales de los pavimentos, se realiza una comparación de resistencia al deslizamiento para dos equipos: SCRIM y el Griptester. En la figura 3.1 se muestra la comparación del valor FR60 obtenido mediante los dispositivos comparados donde se observa la misma tendencia en el valor de fricción.

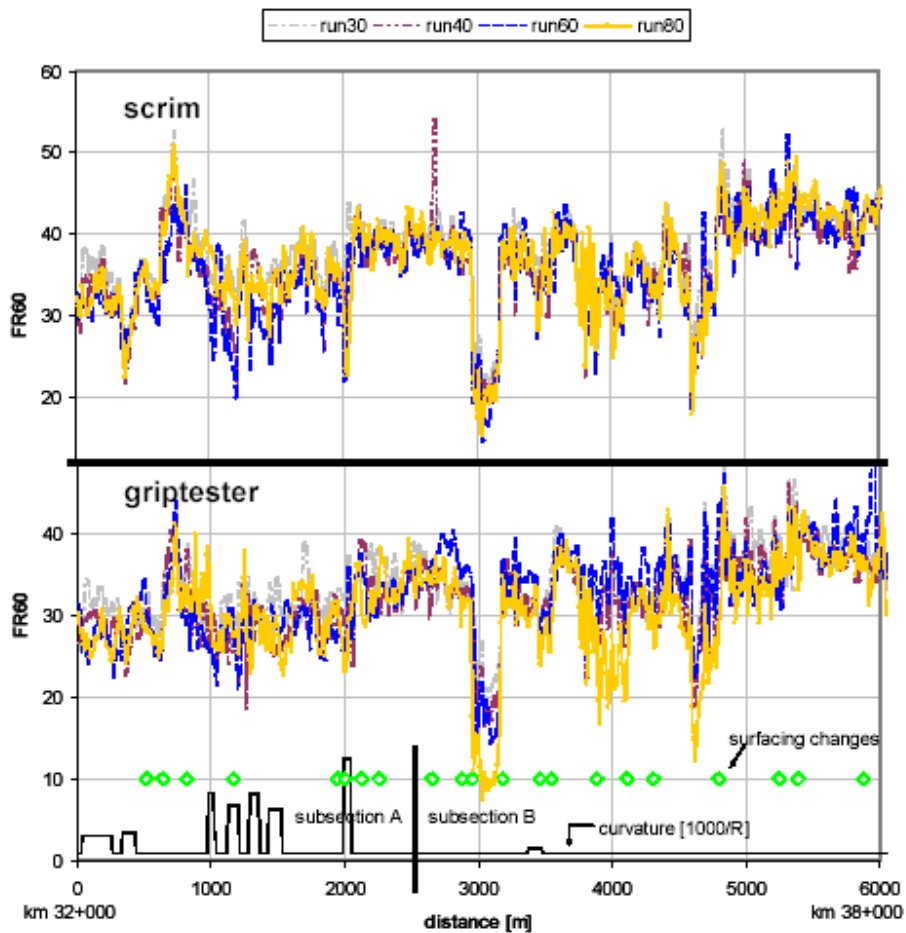


Figura 3.1. Comparación del valor FR60 medidos con SCRIM y Griptester.

En la figura 3.2 se muestra la relación entre el valor FR60 del Griptester y el valor de F60 obtenido mediante el SCRIM, se observa como la correlación experimental es muy parecida a la correlación original obtenida en el experimento de la PIARC para el cálculo del IFI.

En la figura 3.3 se muestra el valor de fricción internacional medido en el experimento en función del coeficiente de fricción aplicando los resultados obtenidos en el experimento de la PIARC, con lo cual se obtiene una correlación aceptable.

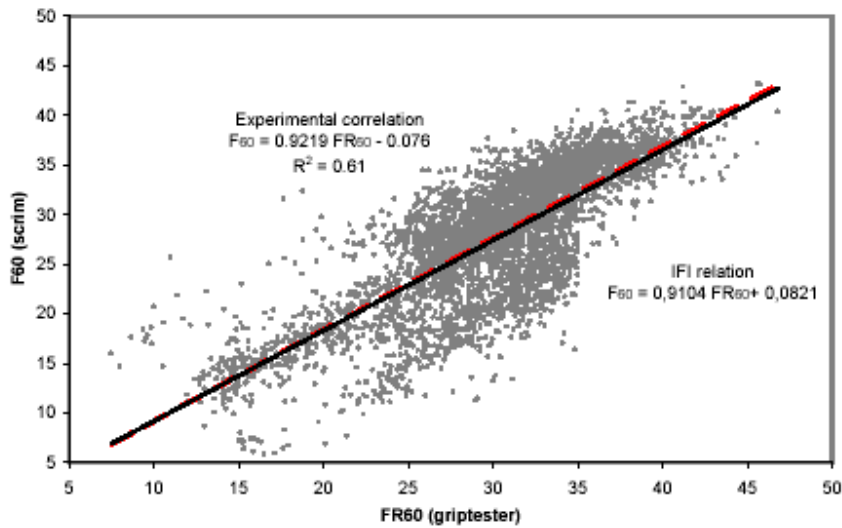


Figura 3.2. Comparación de coeficientes de fricción.

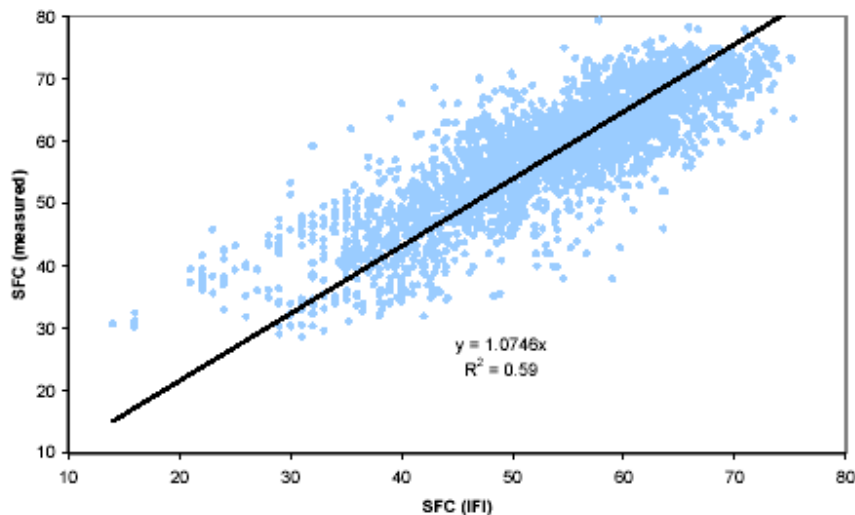


Figura 3.3. Relación entre el valor de coeficiente de Fricción SFC medido y estimado con el GN usando IFI

4. MEDICIÓN DE MACROTEXTURA

Para caracterizar la macrotextura de un pavimento, se utilizan fundamentalmente tres procedimientos:

- *Método volumétrico*: consiste en extender sobre el pavimento, en forma de círculo, un volumen de material (arena o esferas de vidrio). La medida del diámetro permite determinar el área del círculo, y dividiendo el volumen por el área se obtiene la profundidad media de la textura.

- *Medida del drenaje superficial* (drenómetros): consiste en medir el tiempo que demora en evacuarse un volumen de agua determinado, ubicado en el interior del equipo. De esta forma se tiene un indicador que debe ser correlacionado con la profundidad de la textura.
- *Medida del perfil a la escala de la macrotextura* (texturómetros): actualmente existen tres tipos de perfilómetros, los cuales obtienen un perfil digital de la macrotextura. Los tipos son láser, de fotoseccionamiento y de aguja de contacto.

4.1 MANCHA DE ARENA.

Dentro de los equipos de medición puntual se encuentra el ensayo de la mancha de arena, mecanismo que permite evaluar la textura superficial del pavimento. Se aplica a pavimentos asfálticos y de hormigón.

Para la obtención de este indicador, se ha desarrollado un ensayo normado por la ASTM (también norma NLT-335/87 Medida de la textura superficial de un pavimento por el método del círculo de arena) llamado Mancha de Arena, método volumétrico. Consiste en extender sobre la superficie del pavimento un volumen determinado de arena fina, distribuyéndola mediante un dispositivo adecuado. A partir del volumen de arena utilizado y del área cubierta por la misma sobre el pavimento, se calcula una profundidad media de los huecos rellenos por la arena, valor que se utiliza como medida de la textura superficial del pavimento. Se eligen las zonas a ensayar, y se realiza un mínimo de tres mediciones.

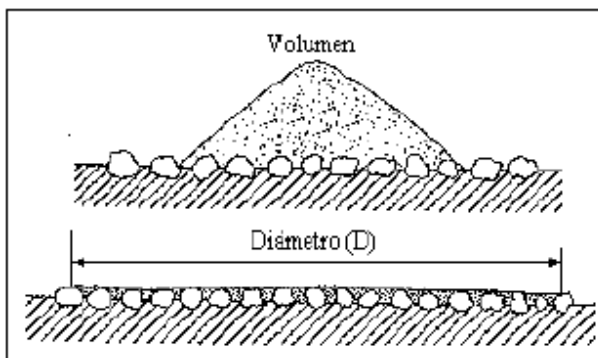


Figura 4.1: Método Volumétrico para medición de textura.

Se necesitan un tubo cilíndrico graduado para medir el volumen de arena a utilizar, un tampón para extender la arena formado por un disco de madera con mango y provisto de un disco de goma dura en su cara inferior, una regla graduada en milímetros para medir el diámetro resultante.

Para el ensayo se pueden utilizar dos tipos de arena de río, lavada y seca previamente, con las siguientes granulometrías:

Arena tipo 40-100: Arena que pasa por la malla 40 y es retenida por la malla 100.

Arena tipo 100-200: Arena que pasa por la malla 100 y es retenida por la malla 200.

El volumen de arena para el ensayo puede ser de:

50.000 ± 200 [mm³]
25.000 ± 150 [mm³]
10.000 ± 100 [mm³]

El volumen y granulometría de la arena a emplear se elegirá en función de la textura del pavimento, de tal forma que el radio del círculo resultante esté comprendido entre 5 y 18 [cm] y el tamaño máximo del grano no sea superior a la profundidad media obtenida.

Este ensayo determina una altura equivalente (H_{eq}) del pavimento medido en milímetros. El valor de H_{eq} está adoptado como parámetro de control de calidad de la superficie de las calzadas en muchos países y definidos los límites de aceptación en función de distintos tipos de caminos.

Este indicador tiene directa relación en la rapidez con que es posible evacuar (drenar) el agua (o evitar el hielo expuesto en la superficie), para permitir un mayor contacto entre el neumático del vehículo y la superficie del pavimento.

La altura equivalente (H_{eq}) se obtiene con la expresión:

$$H_{eq} = \frac{40 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$$

Donde:

V: Volumen de arena utilizado [cm³].

D: Diámetro medido del círculo de arena [cm].

Tabla 4.1: Clasificación de la textura según el valor de H_{eq} .

Textura	H_{eq} [mm]
Muy lisa	$H_{eq} < 0.2$
Lisa	$0.2 < H_{eq} < 0.4$
Media	$0.4 < H_{eq} < 0.8$
Profunda	$0.8 < H_{eq} < 1.2$
Muy profunda	$1.2 < H_{eq}$

La superficie a auscultar debe encontrarse seca y limpia, de forma que la arena se pueda esparcir libremente sobre la superficie y la medida represente el estado real del pavimento.

Al momento de realizar el ensayo se debe proteger del viento, impidiendo que éste esparza la arena depositada sobre el pavimento. Previamente se debe realizar una inspección visual a modo de determinar los sectores homogéneos en los que se realizará el ensayo.

4.2 PERFILÓMETRO LÁSER

Equipo capaz de entregar diversos parámetros, entre ellos se pueden nombrar: IRI, ahuellamiento, textura. Este tipo de equipo existe en gran variedad, pero difieren en la

cantidad de láser que llevan incorporados. Se pueden destacar los tipos remolque, implementados sobre un vehículo con toda la conexión computacional correspondiente. Suele actuar proyectando un rayo sobre un punto del pavimento y un receptor, situado en ángulo respecto al láser, registra la altura de ese punto sobre el pavimento.

Por medio de acelerómetros se obtiene el movimiento vertical del vehículo y el sensor láser permite medir el desplazamiento relativo entre éste y la superficie del pavimento. Las mediciones del perfil se obtienen al sumar el movimiento del vehículo con el desplazamiento entre éste y la superficie.

Este dispositivo es necesario para calcular la Profundidad Media del Perfil (MPD), utilizada en el cálculo de IFI a partir de los diferentes equipos de medición del coeficiente de fricción. Este valor de MPD se calcula cada 10 cm según norma ASTM E 1845.

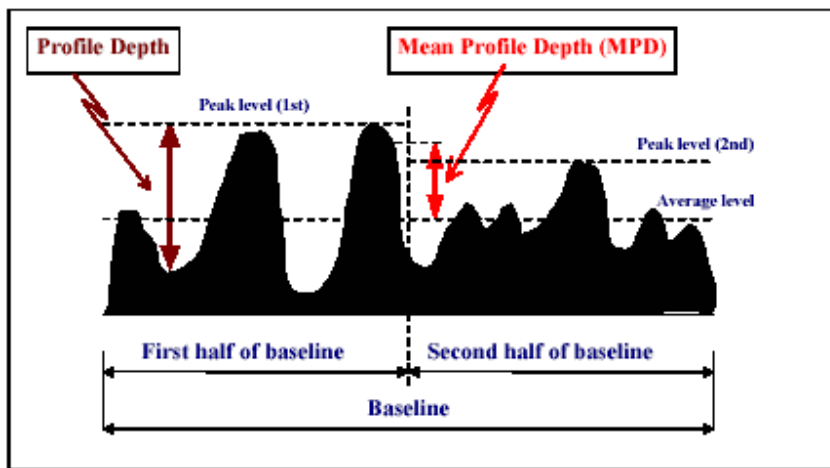


Figura 4.2. Esquema de cálculo de MPD

5. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO EN LAS CALZADAS.

FRANCIA

- **CARPETAS DE RODAMIENTO NUEVAS:** Se controla el coeficiente de pulimento acelerado (CPA) de los agregados y por otro lado la textura de la capa de rodamiento. Los valores de CPA varían entre 0.45 y 0.50, según el tránsito y el tipo de carpeta. En cuanto a la textura solo se controla la macrotextura.

Tabla 5.1: Valores indicativos de “altura de arena”

Lugar	VELOCIDAD (km/h)	Tipo de vía	Tipo de itinerario	Configuración	Valores de umbrales
Urbano	60	Vías comunes	-----	-----	M= 0.2 R= 0.4
	110	Vías rápidas	-----	Conjunto del itinerario	M= 0.4 R= 0.8
Rural	90	Calzadas bidireccionales	Itinerario fácil-demanda de adherencia normal	Conjunto del itinerario	M= 0.4 R= 0.6
				Zonas singulares	M= 0.6 R= 1.2
			Itinerario difícil-demanda de adherencia normal	-----	M= 0.6 R= 1.0
	>110	Autopistas o rutas con calzadas separadas (y vías expresas de 110 km/h)	Itinerario fácil	Conjunto del itinerario	M= 0.4 R= 0.6
				Zonas singulares	M= 0.8 R= 1.2
			Itinerario difícil	-----	M = 0.6 R = 1.0

- ❑ **CAMINOS EN SERVICIO:** Los límites se definen por mediciones de CFT Scrim (microtextura) y por mediciones de macrotextura con el Rugolaser. Las mediciones deben realizarse después de un tiempo mínimo de 3 meses.

Tabla 5.2: Normativa Francesa para el coeficiente de Rozamiento Transversal

CRT	Clasificación
CRT < 0.5	Adherencia débil. Necesita examen urgente
0.50 < CRT < 0.60	Adherencia media. Necesita examen
0.60 < CRT < 0.70	Adherencia satisfactoria. Mantenimiento y vigilancia normal
0.70 < CRT	Adherencia excelente

ESPAÑA

- ❑ **RECEPCIÓN DE OBRAS NUEVAS:** existen valores a ser verificados tanto de macrotextura expresada en “altura de arena” como de microtextura expresada con el “Péndulo de fricción”.

Tabla 5.3: Especificaciones para recepción de carpetas de rodamiento nuevas.

Tipo de Carpeta	Altura de arena (mm)	Péndulo de fricción
Mezcla bituminosa	0.7	0.65
Hormigón	0.7 a 0.1	-----
Tratamiento superficial textura fina	0.6	0.55
Tratamiento superficial textura media	0.8	0.60
Tratamiento superficial textura gruesa	>1	0.65

Tabla 5.4: Coeficiente de pulimento acelerado del agregado grueso para capas de rodadura

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
T00	T0 y T1	T2	T3, t4 y arcenes
≥0.55	≥0.50	≥0.45	≥0.40

- ❑ **CAMINOS EN SERVICIO:** Es una recomendación, pero ni implica un cumplimiento obligado. Las recomendaciones están referidas a valores del coeficiente de fricción transversal (CFT), medido con Scrim, a 60 km/h de velocidad y 0.5 mm de espesor de película de agua.

Tabla 5.5: Recomendaciones de CFT Scrim para caminos en servicio

Valor de CFT medido con Scrim	Acción de mantenimiento
CFT > 50	Ninguna, buen estado
50 > CFT > 40	Seguimiento de la evolución y actuación tan pronto se dispone de medios
40 > CFT	Actuación inmediata

INGLATERRA

- ❑ **RECEPCIÓN DE OBRAS NUEVAS:** Se mide la macrotextura con la “mancha de arena”, expresando los límites a verificar en función del tipo de carpeta de rodadura. En cuanto a la microtextura, se deben utilizar agregados que tengan un coeficiente de pulimento acelerado CPA adecuado al tránsito que ha de soportar esa parte de la red.

Tabla 5.6: Profundidad de textura en obras nuevas

CAPA DE RODAMIENTO	PROFUNDIDAD DE ARENA (MM)
Superficies bituminosas	Media del total del tramo > 1.5 Media de 10 medidas individuales > 1.2
Superficies de hormigón	Media de 10 medidas > 1

- ❑ **CAMINOS EN SERVICIO:** La macrotextura superficial se mide a la velocidad de circulación del tránsito, mediante el equipo de auscultación de carreteras de alta velocidad HRM (High speed Road Monitor), el cual utiliza una tecnología basada en rayos láser. La resistencia al deslizamiento se evalúa mediante el equipo scrim a una velocidad estándar de 50 km/h .

Tabla 5.7: Niveles de alarma para el coeficiente medio estival de CFT en distintas zonas, medido con Scrim a 50 km/h .

Zona	Definición de la zona	Niveles de alarma del MSSC (50 km/h)							
		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
		CLASIFICACION DEL RIESGO CORRESPONDIENTE							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Autopista (tramos 100 m)		X						
B	Doble calzada (situación normal) (tramos 100 m)		X						
C	Doble calzada (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)			X					
D	Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)			x					
E	Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)				X				
F	Aproximaciones y salidas de intersecciones principales (idem D)				X				
G1	Pendiente del 5% al 10% en mas de 50 m (idem D) Doble calzada (pendiente abajo) Calzada única (ambas pendientes)				X				
G2	Pendiente superior al 10% en mas de 50 m (idem D) Calzada doble (pendiente abajo)					X			
H1	Curva radio<250 m (idem D)				X				
J	Aproximación a rotondas (idem D)						X		
K	Aproximación a semáforos, pasos de peatones, paso de ferrocarril (idem D)						X		
H2	Curva radio < 100 m (idem D) (medicion a 20 km/h)					X			
L	Rotonda (tramos de 10 m) (medición a 20 km/h)				X				

REINO UNIDO

La administración de carreteras especifica, para contratos de construcción, pruebas de PSV en circunstancias donde se ha encontrado que el pulimento es importante.

Tabla 5.8: Sitios y valores mínimos de PSV para pavimentos flexibles

Sitio	Definición	Vehículos comerciales por día	PSV
A1 (difícil)	(i) Acercamiento a señales de tránsito en carreteras donde el 15% de los carros tiene un velocidad > a 64km/h	<250 250-1000 1001-1750 >1750	60 65 70 75
	(ii) Acercamiento a zonas peatonales en vías urbanas principales		
A2 (difícil)	(i) Acercamiento y cruce de intersecciones principales en vías con más de 250 vehículos comerciales por día	<1750 1750-2500 2501-3250 >3250	60 65 70 75
	(ii) Rotondas y sus aproximaciones		
	(iii) Radios de curvatura < 150 m en caminos donde el 15% de los vehículos tiene una velocidad > a 64km/h		
	(iv) Pendientes del 5% o mayores, >1000 m		
B (promedio)	generalmente secciones rectas y largos radios de curvatura en	<1750 1751-4000 >4000	55 60 65
	(i) autopista		
	(ii) caminos principales (iii) otros caminos >250 vehículos comerciales por día		
C (fácil)	(i) Secciones rectas de caminos con poco tránsito < 250 vehículos comerciales por día		45
	(ii) Otros caminos donde los accidentes debido al deslizamiento no son problema		

Tabla 5.9: Niveles de investigación para el coeficiente de fricción GN en distintas zonas, medido con Griptester a 50 km/h .

Zona	Definición de la zona	Niveles de alarma del MSSC (50 km/h)							
		0.42	0.48	0.54	0.60	0.66	0.72	0.78	0.84
		CLASIFICACION DEL RIESGO CORRESPONDIENTE							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Autopista (tramos 100 m)		X						
B	Doble calzada (situación normal) (tramos 100 m)		X						
C	Doble calzada (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)			X					
D	Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)			x					
E	Calzada única (intersecciones secundarias) (50 m aproximación)				X				
F	Aproximaciones y salidas de intersecciones principales (idem D)				X				
G1	Pendiente del 5% al 10% en mas de 50 m (idem D) Doble calzada (pendiente abajo) Calzada única (ambas pendientes)				X				
G2	Pendiente superior al 10% en mas de 50 m (idem D) Calzada doble (pendiente abajo)					X			
H1	Curva radio < 250 m (idem D)				X				
J	Aproximación a rotondas (idem D)						X		
K	Aproximación a semáforos, pasos de peatones, paso de ferrocarril (idem D)						X		
H2	Curva radio < 100 m (idem D) (medicion a 20 km/h)					X			
L	Rotonda (tramos de 10 m) (medición a 20 km/h)				X				

PAÍSES BAJOS

Tabla 5.10 Clasificación del pavimento según el coeficiente de fricción transversal

CRT	Clasificación del pavimento
0.36	Peligroso
0.36-0.40	Muy liso
0.41-0.45	Liso
0.46-0.50	Bastante liso
0.51-0.55	Medianamente anti derrapante
0.56-0.70	Anti derrapante
0.70	Muy anti derrapante

CHILE

Tabla 5.11 Valores mínimos de Coeficiente de fricción medido con SCRIM a 50km/h

Descripción del Sector	SFC
Curvas de radio inferior a 100 [m] Pendientes Negativas > 10% Aproximación a Intersecciones Intersecciones Aproximaciones a Semáforos Aproximación a discos de Advertencia (Pare, Ceda el paso etc.) Ramales	0.55
Autopistas Autovías Vías Rápidas Carreteras Convencionales Otros	0.40

Tabla 5.12 Valores mínimos de Coeficiente de roce medido con Péndulo Ingles

Tipo de Sitio	Coef. de Roce
1 Rotondas 2 Curvas con radios menores a 150 [m] 3 Pendientes 1/20 o mayores y pendientes de largos mayores a 100[m] 4 Aproximaciones a cruces semaforizados en vías no restringidas	0.55
Vías interurbanas de categoría autopista primaria y colectora. Vías urbanas con tráficos con flujos mayores que 2000 veh/día.	0.50
Todas las demás vías	0.40

OTRA NORMATIVA

Tabla 5.13: Coeficiente de pulimento de los agregados (PSV) necesario para alcanzar la resistencia al deslizamiento requerida en capas de rodadura, bajo distintas condiciones de tránsito.

SFC REQUERIDO (50 KM/H)	PSV necesario					
	Vehículos por carril por día					
	250 o menos	1000	1750	2500	3250	4000
0.30	30	35	40	45	50	55
0.35	35	40	45	50	55	60
0.40	40	45	50	55	60	65
0.45	45	50	55	60	65	70
0.50	50	55	60	65	70	75
0.55	55	60	65	70	75	
0.60	60	65	70	75		
0.65	65	70	75			
0.70	70	75				
0.75	75					
AAV	No mayor a 12			No mayor a 10		

Tabla 5.14: Niveles de alarma (revisados para el 2004) para el coeficiente medio estival de CFT en distintas zonas, medido con Scrim a 50 km/h .

Zona	Definición de la zona	Niveles de alarma del MSSC (50 km/h)							
		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
		CLASIFICACION DEL RIESGO CORRESPONDIENTE							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Autopista (tramos 100 m)								
B	Doble calzada								
C	Calzada única								
Q	Aproximaciones y salidas de intersecciones principales y rotondas								
K	Aproximación a semáforos, pasos de peatones, paso de ferrocarril (idem D)								
R	Rotonda								
G1	Pendiente del 5% al 10% en mas de 50 m								
G2	Pendiente superior al 10% en mas de 50 m								
S1	Curva radio < 500 m doble calzada								
S2	Curva radio < 500 m calzada única								

NORMATIVA NACIONAL CON RESPECTO A LA LISURA SUPERFICIAL (CR –2002)

406.24 TEXTURA SUPERFICIAL (aplica tanto para mezclas asfálticas, como para losas de hormigón): Una vez terminada la compactación de la mezcla, el coeficiente de resistencia al deslizamiento deberá ser, como mínimo, de 0,45 en cada ensayo individual.

El Contratista, bajo la supervisión del ingeniero, deberá realizar por lo menos dos ensayos diarios, para determinar este coeficiente de fricción de conformidad con el ensayo AASHTO T-278 o ASTM E 303.

Todos los paños que no cumplan con este requisito deberán ser removidos o corregidos mediante algún método aceptado por el ingeniero. No se admitirán desviaciones de este coeficiente mínimo de 0,45.

6. EXPERIENCIA INTERNACIONAL

6.1 TRAMO EXPERIMENTAL DEL CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA DEL ASFALTO DE LA UNIVERSIDAD DE AUBURN ALABAMA

En esta pista de ensayo a escala natural, se ha encontrado una ecuación que relaciona el valor de fricción obtenido a partir de un equipo con neumático de hule acanalado (equipo no especificado) como se observa en la siguiente figura:

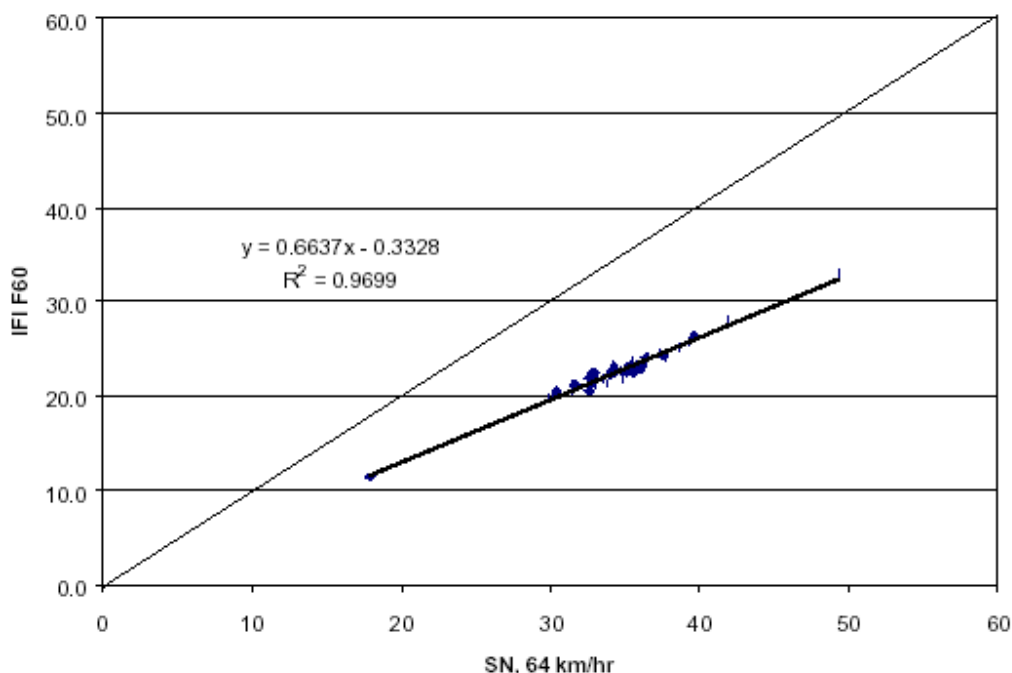


Figura 6.1 Índice Internacional de Fricción versus skid number a 6.44 millones de ESALs.

Las diferentes secciones de este tramo presentan un rango muy amplio de graduaciones y tipos de agregados. El rango de porcentaje de material pasando las mallas 2 .36 mm (No. 8) varía de 13 a 54 por ciento. Se han utilizado tanto 9.5 mm como 12.5 mm como tamaño nominal del agregado. Para el análisis, las graduaciones se han dividido en cinco rangos: sobre la zona de restricción Superpave (ARZ), a través de la zona de restricción (TRZ), por debajo de la zona de restricción (BRZ), mezclas de matriz de agregado grueso (SMA) y mezclas drenantes (OGFC).

Como se muestra en la Figura 6.2, mezclas SMA y OGFC tienen un coeficiente de fricción más bajo al principio, con respecto a las demás mezclas, debido a su alto contenido de ligante. Como el ligante recubre mejor el agregado expuesto, las mezclas SMA mantienen un coeficiente de fricción alto comparado con mezclas Superpave y mezclas OGFC.

Aunque tanto el SMA como las mezclas de OGFC indican un coeficiente promedio ligeramente más bajo que las mezclas Superpave ARZ y BRZ, este valor no es tan importante como el aumento en la macrotextura que estas mezclas proporcionan. El

OGFC proporciona una reducción del rocío o spray y el hidropelaneo canalizando el agua lejos del interfaz de neumático/camino.

La macrotextura alta de SMA proporciona ventajas similares mezclas de un grado menor. Las secciones TRZ, típicas de gradaciones de mezcla Superpave, tienen los coeficientes más bajos para todas las mezclas. Este puede indicar la influencia de propiedades volumétricas de la mezcla, como VMA, sobre la resistencia al deslizamiento medida. Todos los cinco tipos de mezcla todavía mantenían la fricción adecuada después de aproximadamente 7 millones de Ejes Equivalentes.

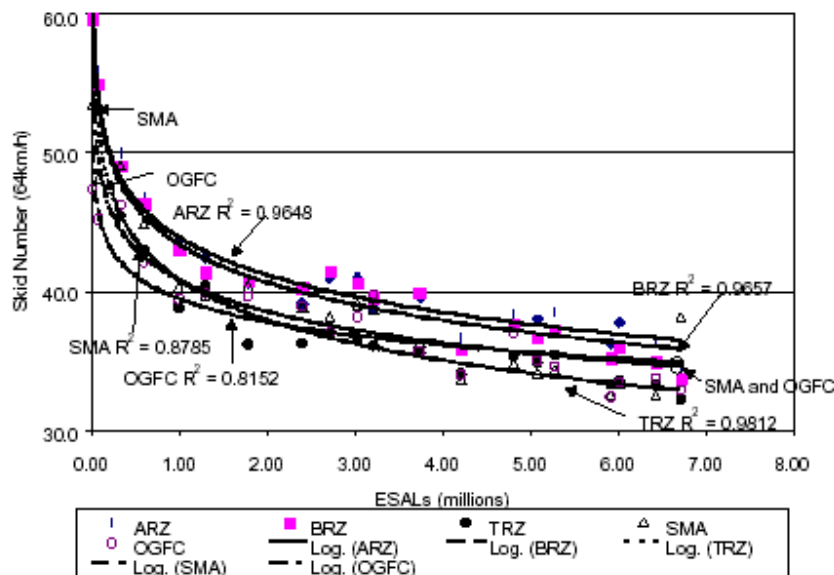


Figura 6.2 Coeficiente de Fricción en función del Ejes Equivalentes por tipo de gradación.

La Figura 6.3 muestra la profundidad media del perfil (MPD) después de 4.81 EEq versus el porcentaje de agregado pasando la malla de 2.036 mm (No. 8). Por medio de un análisis de varianza se determinó al 95% de confianza la significancia de la gradación sobre el MPD.

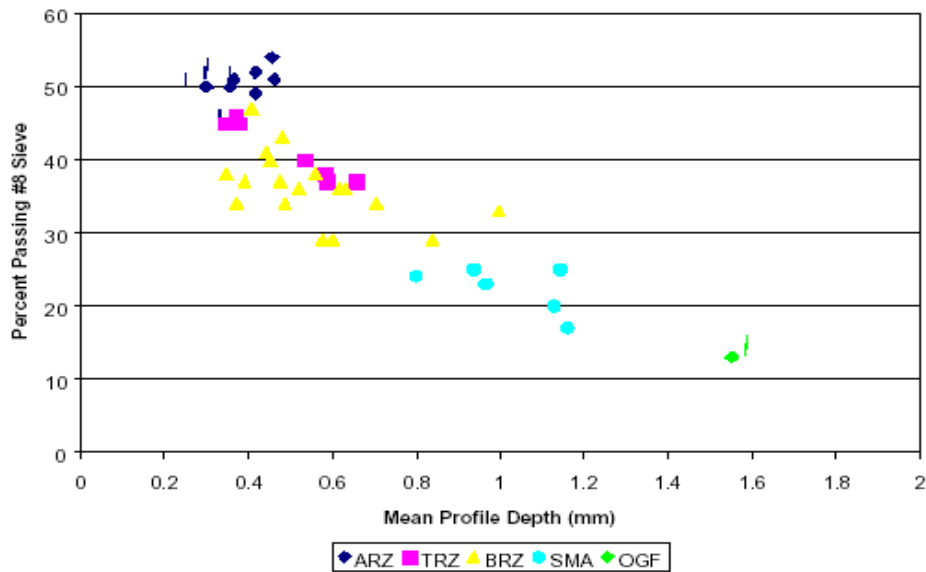


Figura 6.3 Profundidad media del perfil versus el porcentaje pasando la malla de 2.36 mm

La Figura 6.4 muestra la variación de MPD, por tipo de graduación, con el tiempo. El valor promedio para secciones ARZ y TRZ indican un crecimiento leve con el tiempo, mientras que las secciones con mezclas SMA y OGFC indican una reducción, esto debido principalmente a la reorientación de las partículas de agregado bajo las cargas de tránsito. Por medio de un análisis de varianza se determinó que el paso del tiempo no explica la variabilidad medida del MPD inclusive al 70% de confianza.

Cierto tipo de agregado tiende a pulirse bajo las cargas de tránsito. Esta acción puede llevar a la reducción de la resistencia al deslizamiento con el tiempo. En este tramo experimental se han utilizado siete tipos de agregado, entre los cuales se encuentran: granito, calizas y grava de río como se muestra en la Figura 6.5. Muchas agencias en los Estados Unidos adhieren escorias o fibras a la mezcla con piedra caliza para mejorar su resistencia al pulimento; la Figura 6.5 muestra como estas mezclas tienen el más alto coeficiente de fricción al inicio, pero con el tiempo (después de 4.8 millones de EEq) se obtiene el valor más bajo.

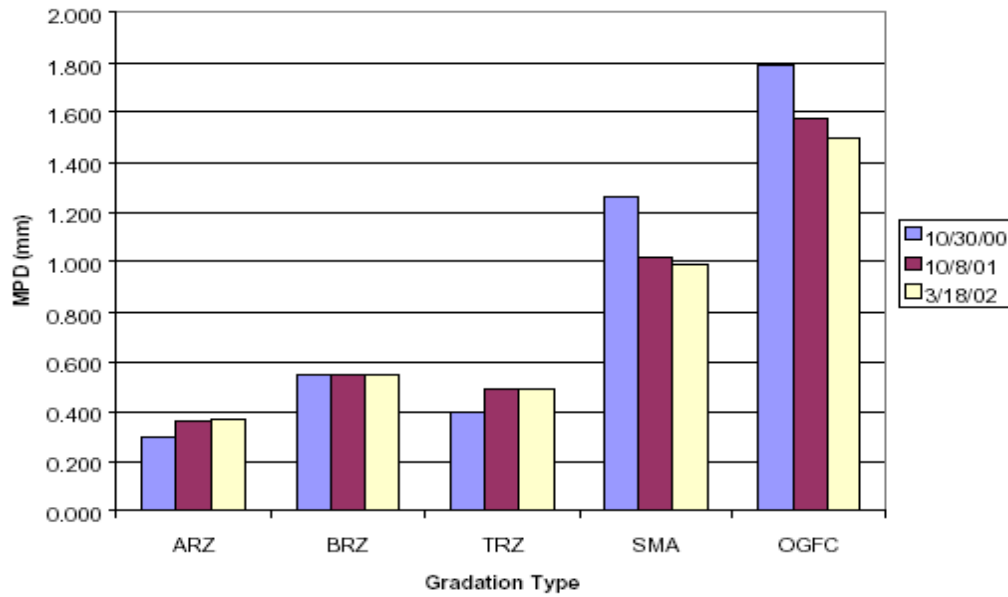


Figura 6.4 Profundidad media del perfil, por tipo de graduación, variando en el tiempo.

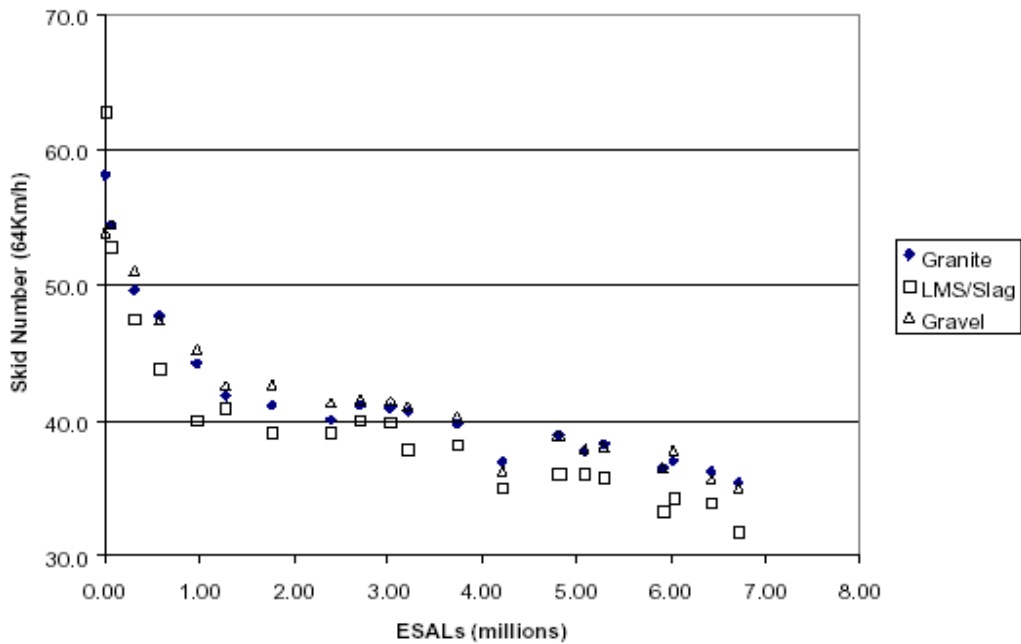


Figura 6.5 Coeficiente de fricción versus EEq como una función del tipo de agregado

El uso de agregados cúbicos y resistentes al abrasión es de uso común en mezclas SMA. Varias de las secciones cuentan con material calizo propio de la zona con valores de resistencia a la Abrasión de 20. Desafortunadamente como se observa en la Figura 6.6 la

combinación SMA – agregado calizo, produce una reducción en la resistencia al deslizamiento.

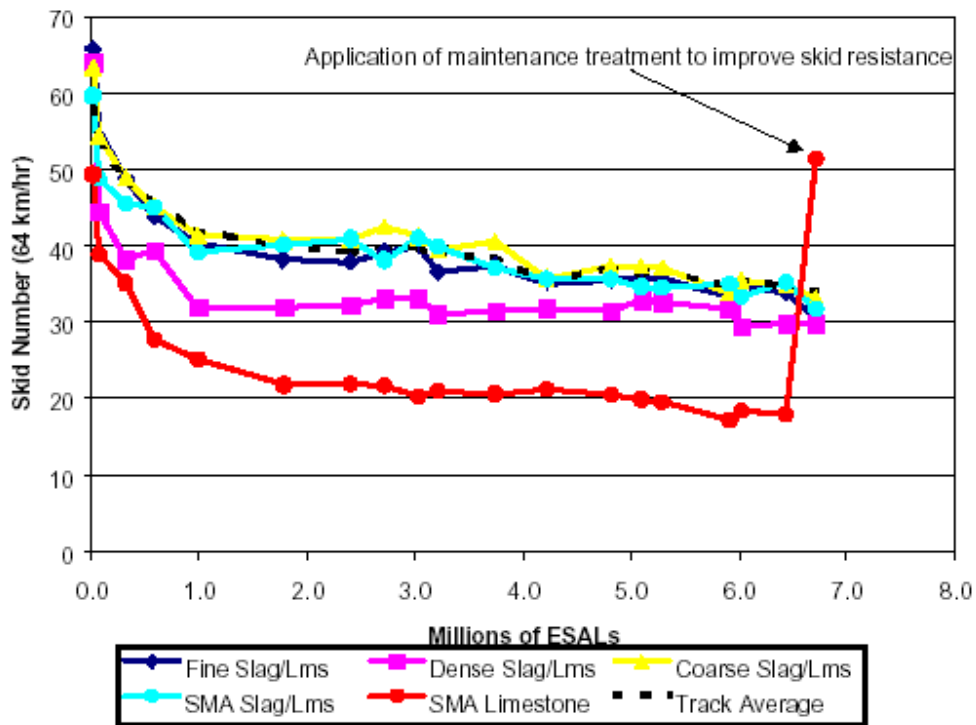


Figura 6.6 Comparación del coeficiente de fricción versus EEq para secciones con agregado calizo

6.2 EXPERIECIA MEXICANA

Gráficas de aceptación o rechazo

El modelo PIARC puede ser utilizado en la administración de pavimentos estableciendo niveles de intervención del IFI, considerando ciertos valores o niveles mínimos de fricción y textura, según las condiciones prevalecientes y las necesidades requeridas en cada país o zona. Para ello se trabaja con un gráfico que indica la relación entre los valores de fricción, FR, y los valores de textura, Tx, como se ilustra en la Figura 6.7.

Esta gráfica puede servirnos para dos casos:

- El primer caso como apoyo para proyectar la superficie de rodamiento, es decir, que tipo de textura nos dará la velocidad de operación, tal que para condiciones críticas (pavimento mojado), los vehículos operen con seguridad.
- El segundo, como valuator de una carretera, estableciendo si requiere o no de mejorar, la micro o macrotextura.

LA GRÁFICA SE DIVIDE EN CUATRO CUADRANTES PODRÍAMOS APRECIAR LO SIGUIENTE:

- I. En el primer cuadrante encontramos que la superficie de pavimento requiere mejorar la macrotextura, esto podrá ser posible mejorando con la colocación de un riego de sello o una micro carpeta con el diseño adecuado que permita desalojar el volumen de agua que se presente por la precipitación específica de ese lugar.
- II. En el segundo cuadrante, (siguiendo las manecillas del reloj) entramos que según nuestros límites de F60 y Sp, encontraremos los puntos que cumplen con una adecuada micro y macrotextura para las necesidades de nuestra carretera.
- III. En el tercer cuadrante, encontramos que se requiere mejorar la microtextura, que esto podrá ser si se mejora la calidad del material pétreo de la carpeta (o si se utiliza concreto).
- IV. En el cuarto cuadrante, se presenta la situación más crítica del pavimento, ya que se requiere mejorar ambas, micro y macrotextura.

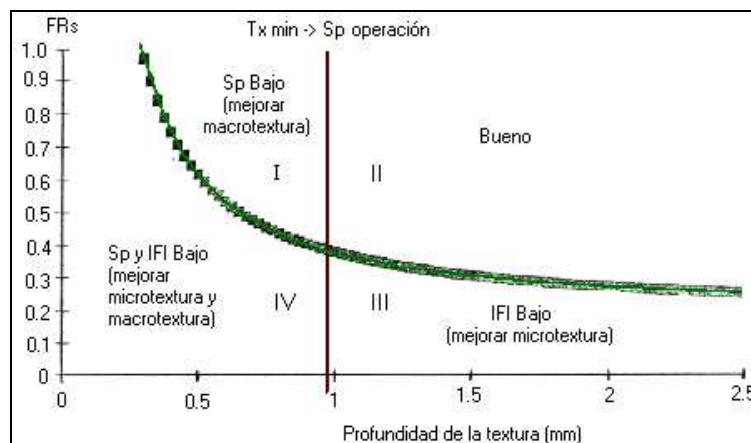


Figura 6.7. Interpretación de las zonas del diagrama de Fricción vs. Macrotextura.

7. CORRELACIÓN ENTRE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Y SEGURIDAD VIAL.

Uno de los principales factores que afecta la seguridad vial, es la fricción entre los neumáticos del vehículo y la superficie de rueda. El mantener un nivel de seguridad adecuado implica que el conductor adapte su comportamiento al conducir dependiendo de las condiciones de fricción, principalmente hacia un ajuste de la velocidad.

Varios estudios, en Alemania, han demostrado la necesidad reducción de la velocidad con la reducción de la resistencia al deslizamiento. Por ejemplo para carreteras con una velocidad de diseño de 90 km/h y velocidades de operación entre 85 a 90 km/h, con coeficientes de fricción de 0.8 y asumiendo el tiempo de reacción del conductor de 1 segundo se obtiene una distancia de frenado aproximada de 65 metros, mientras que

para un coeficiente de fricción de 0.25 la distancia de frenado casi se duplica a 129 m. Para mantener la distancia de frenado se necesita reducir la velocidad a 56 km/h (Figura 7.1).

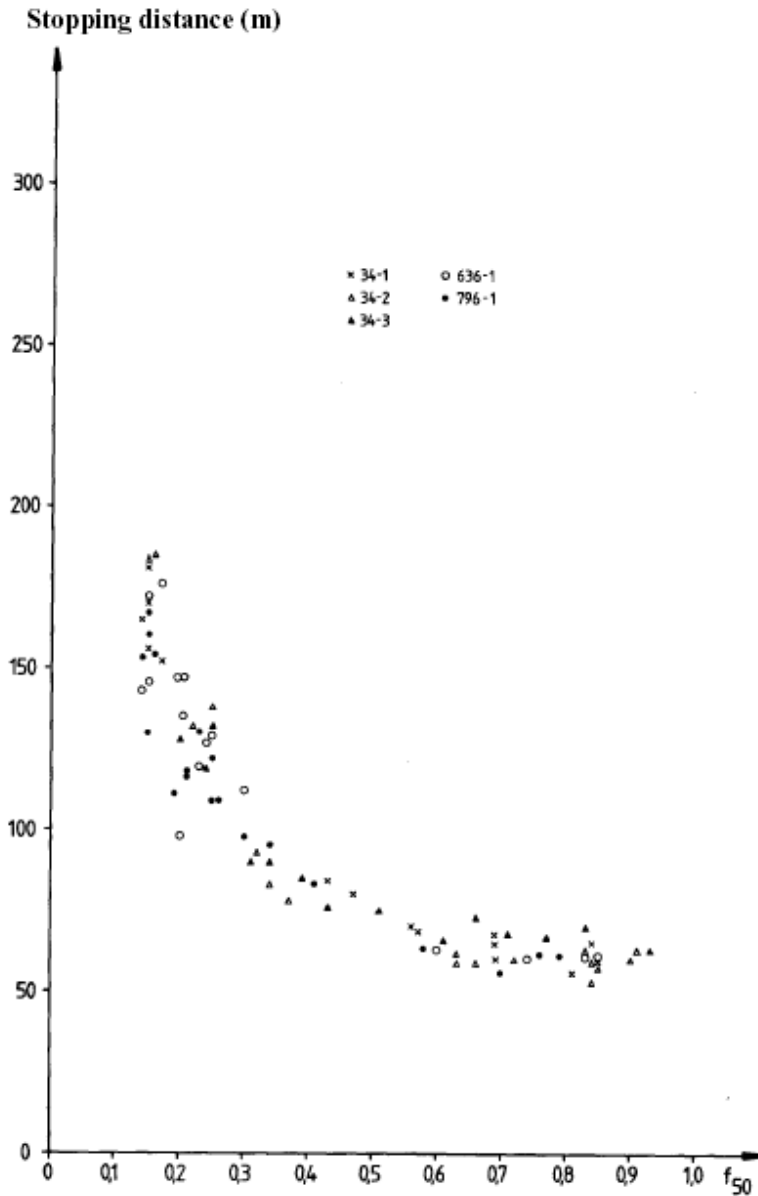


Figura 7.1 Distancia de frenado en función del coeficiente de fricción (Alemania).

En un estudio realizado en Londres, aplicando el Péndulo Ingles, para determinar riesgo relativo de accidentes en función de la resistencia al deslizamiento. En la Figura 7.2 se observa esta relación, y la forma de la curva sugiere que para valores por debajo de 55 pueden ser aceptados para caminos con condiciones fáciles de manejo, y valores por debajo de 45 probablemente indican potencialidad de deslizamiento sin importar las condiciones de la superficie y del tránsito.

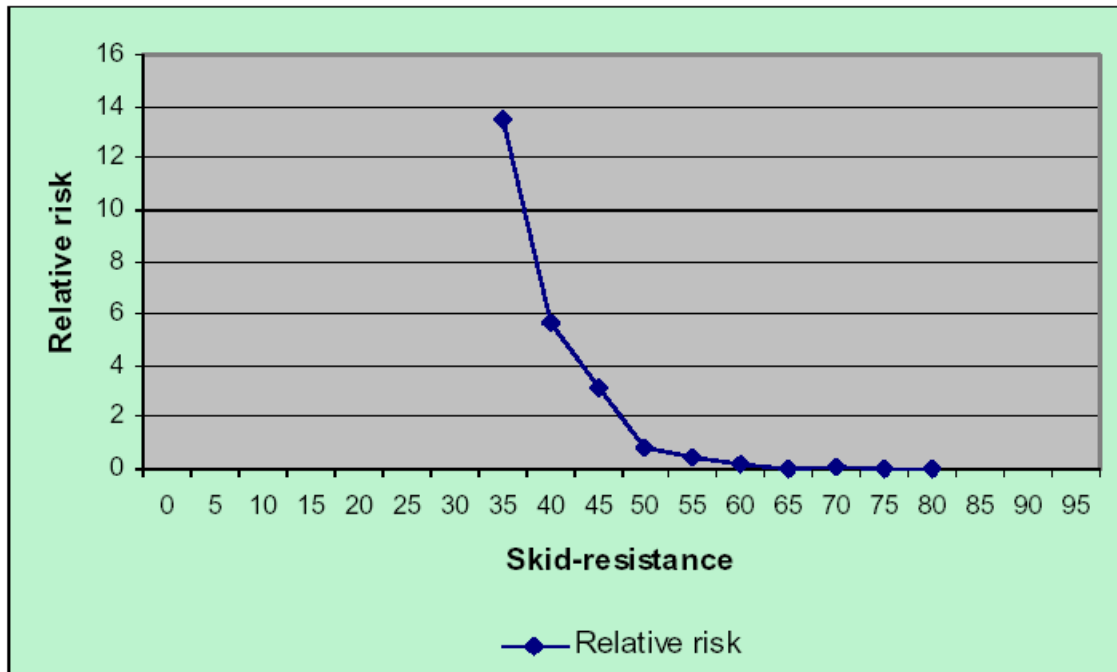


Figura 7.2 Riesgo relativo de accidentalidad por efecto de la variación en la resistencia al deslizamiento (Inglaterra).

Se han desarrollado ecuaciones para relacionar la resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento con el porcentaje de accidentes de tránsito en condiciones húmedas, por ejemplo para carreteras de alta velocidad (90 km/h) ese porcentaje puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$WAR = -21.7 + 0.0009*ADT + 2.34*ACC - 0.40*SN + 286*TW + 1.32*LN$$

Y para caminos de baja velocidad:

$$WAR = -0.75 + 0.0001*ADT - 0.053*VM + 0.54*V + 0.69*ACC - 0.025*SN$$

Donde:

- WAR: porcentaje de accidentes en condición húmeda
- ADT: tránsito promedio diario
- ACC: Acceso (escala subjetiva de niveles de congestión)
- SN: coeficiente de fricción (65 km/h)
- TW: porcentaje del tiempo en estado húmedo
- VM: velocidad media del tránsito
- V: desviación estándar de la distribución de velocidades
- LN: número de carriles.

CRITERIO DE SEGURIDAD VIAL POR MEDIO DE ESTABILIDAD DINÁMICA

Se considera como el principal criterio de diseño de curvas horizontales, se relaciona directamente con la dinámica de la conducción, que es controlada por las leyes físicas del movimiento de un vehículo e involucra sus propiedades, las del trazado y del pavimento de la vía por la que circula. Este criterio se basa en la diferencia entre la oferta y la demanda del coeficiente de fricción entre neumático y superficie. Para una conducción segura la oferta debe ser mayor a la demanda del coeficiente de roce.

- El roce demandado corresponde al coeficiente de roce que permite una estabilidad dinámica a la velocidad que circulan los vehículos en zonas curvas.
- El roce ofrecido se puede considerar de dos maneras: como roce asumido (f_a), aquel que teóricamente se ofrece por diseño geométrico; y como roce existente (f_e), corresponde a la fricción que ofrece el pavimento para la velocidad de circulación de los vehículos.

$$f_a = \frac{V_d^2}{127 \cdot R} - e$$

Donde:

V_d : velocidad de diseño [km./hr].

R : radio de curvatura [m].

e : peralte [%].

Se puede observar que el roce asumido no hace diferencia al tipo de material empleado ni a las condiciones climáticas, lo cual sí afecta al roce demandado y, por consiguiente, la seguridad en la conducción. Una forma de obtener el coeficiente de fricción existente en la dirección radial es medirlo directamente en terreno, se debe tener en cuenta que la máxima transmisión de la fuerza de roce depende de las características del neumático y pavimento y de la presencia de sustancias en el área de contacto. De aquí que se necesite un estudio de la micro y macrotextura que ayude a determinar el estado del pavimento. Además de las condiciones climáticas del lugar, toma gran importancia la humedad del pavimento, ya que la presencia de una película de agua sobre el pavimento disminuye el valor de la fricción.

Para determinar la fricción demandada se debe determinar la velocidad de percentil 85 (V_{85}) para cada curva, donde afectará las condiciones de visibilidad, percepción del conductor en cuanto a la sensación de confort y seguridad en la conducción, características geométricas, intensidad del tráfico, condiciones del pavimento.

Considerando las diferencias entre el coeficiente de fricción ofrecido y demandado es posible clasificar un pavimento en cuanto a su seguridad.

La ecuación general para el factor de fricción radial (fricción existente) máximo permisible es la siguiente:

$$f_r = n \cdot 0.925 \cdot f_T$$

f_r : coeficiente de fricción en la dirección radial.

f_T : coeficiente de fricción en la dirección tangencial (longitudinal).

n: razón que varía entre 40 – 50 % (depende del porcentaje de fricción radial útil).

Para determinar el valor de "n" se debe tener en cuenta el tipo de camino y la topografía que se presenta, además de considerar el valor máximo y mínimo del peralte. (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Valores de “n” dependiendo de la categoría de camino, topografía y peralte.

Condiciones	e _{máx}	e _{mín}	n %
Topografía Plana	8-9%		45
Topografía Ondulada	7%		40
Todo tipo de topografía		2.50%	10
Proyectos de elevación de estándar	6%		60
		2.50%	30

8. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA ENSAYOS DE FRICCIÓN (GRIPTESTER).

Tabla 8.1 Características del equipo de medición.

Dimensiones	1010 mm: largo 790 mm: ancho 510 mm: altura
Peso	85 – 90 kg
Sistema de medición	Braked wheel, fixed slip (15%)
Medición de fuerza de arrastre (Drag) y carga vertical (Load)	Medidas directamente
Rango de espesores de película de agua	0.05 a 1.0 mm
Intervalos de medición	5, 10, 20, 50 m
Valor de fricción desplegado	Gripnumber (GN) 0.00 a 1.20
Rango permisible de velocidades	5 km/h hasta 130 km/h ICAO recomienda 65 y 95 km/h para pistas de aeropuerto. En carreteras la velocidad usual es de 50 km/h para zonas de alta velocidad y 20 km/h para zonas de baja velocidad.
Condiciones de superficie	ICAO recomienda espesor de película de agua de 1 mm. El requerimiento estándar para carreteras es de 0.25 mm de espesor.
Tipo de llanta de medición	Conforme a la norma ASTM E1844
Expectativa de vida de la llanta de medición	Entre 700 y 1000 km dependiendo de la textura de la superficie.
Expectativa de vida del equipo	Al menos 20 años.

Norma de ensayo Británica para la medición de la fricción superficial de pavimentos (BS 7941-2:2000)

Método de ensayo para la medición de la resistencia al deslizamiento usando el GripTester.

Cuando sea posible la superficie a medir debe estar libre de agua estancada, congelada, libre de aceites o grasas y sin contaminación.

El sistema de alimentación hidráulica debe fijarse para proveer el flujo de agua requerido. Con el flujo de agua se asegura primero, el espesor de película de agua necesario para la medición, y segundo limpieza de la superficie. En la Tabla 8.2 se muestra la relación de flujo de aplicación, velocidad de medición y espesor de película de agua. La temperatura del agua no debe ser menor de 5 °C y no superar los 25 °C.

Tabla 8.2 Flujo de agua depositado (lt/min)

Velocidad (km/h)	Espesor de película de agua teórico (mm)				
	0.20	0.25	0.30	0.50	1.00
6	1.0	1.2	1.5	2.5	5.0
20	3.3	4.2	5.0	8.3	16.5
50	8.3	10.4	12.5	20.8	41.7
65	10.8	13.5	16.3	27.1	54.2
95	15.8	19.2	23.8	39.6	79.2

Antes del primer ensayo, se debe revisar el sistema de medición, para ver si se ha estabilizado. Esto debe hacerse encendiendo el equipo 5 minutos antes de ponerlo en movimiento y se debe comenzar la medición después de al menos 500 m con el sistema de alimentación de agua encendido. En lo posible, esta superficie de prueba debe ser representativa del tramo por medir.

Con el sistema en funcionamiento se debe fijar la velocidad de acuerdo con los estándares establecidos por el constructor. Algunas velocidades estándar son (20±5), (50±5), (65±5), (95±5) km/h.

El equipo debe fijarse para medir en rangos de 40 mm, 160 mm, 400 mm o 800 mm. El sistema de recolección de datos debe ser capaz de captar los valores de fricción entre 40 mm y 10 m.

Con respecto a la precisión para un ensayo de rutina a 50 km/h con un flujo de agua de 18 l/min la repetibilidad del GripTester es de $r=0.02$ y la reproducibilidad de $R=0.08$.

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

9.1 ESCENARIOS DE MEDICIÓN DE FRICCIÓN

Para este estudio se seleccionaron 3 escenarios para valorar el efecto del espesor de película de agua, la velocidad de medición y la macrotextura en dos últimos solamente medidos en 2 casos.

Tabla 9.1 Variables de medición

Variable	Escenarios
Velocidad	20, 50, 65 km/h
Espesor de película de agua	0.25, 0.4, 0.55, 0.75*, 1.0** mm.
Pavimento	Hormigón, concreto asfáltico, textura fina, concreto asfáltico textura gruesa (tramos de media a alta velocidad de circulación, por encima de los 60 kph)
Intervalo de medición	5 m y 10 m
Otros parámetros de medición	IRI, Roderas, perfil*** y fricción con péndulo inglés.

* Para velocidades altas

** Para un caso de medición

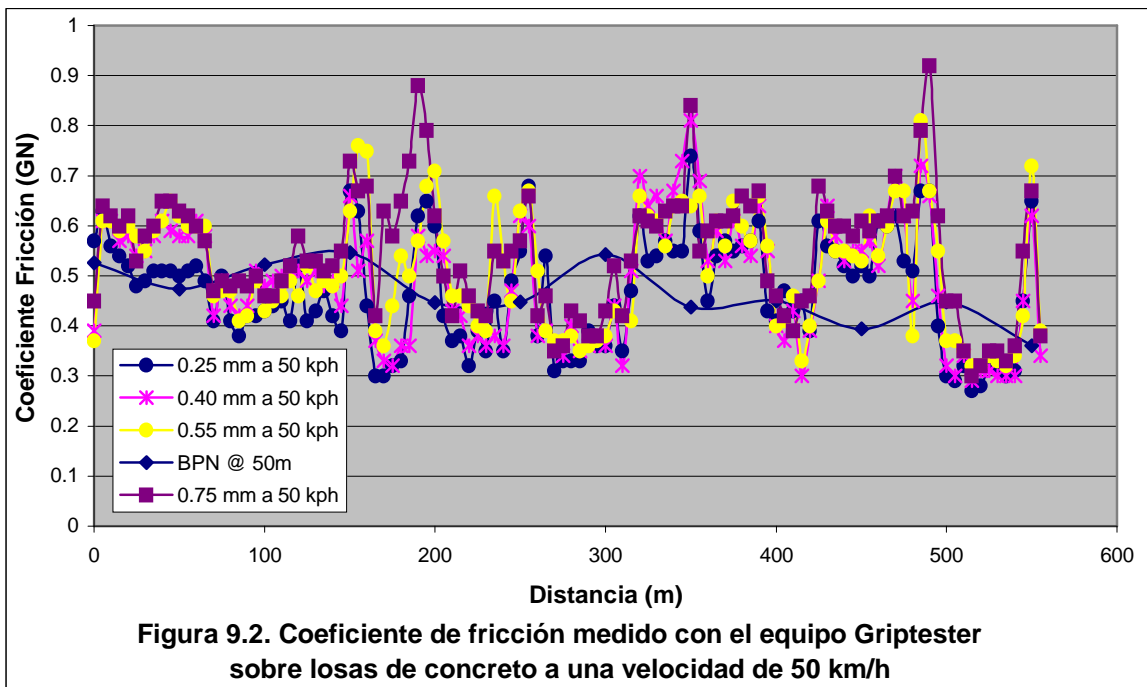
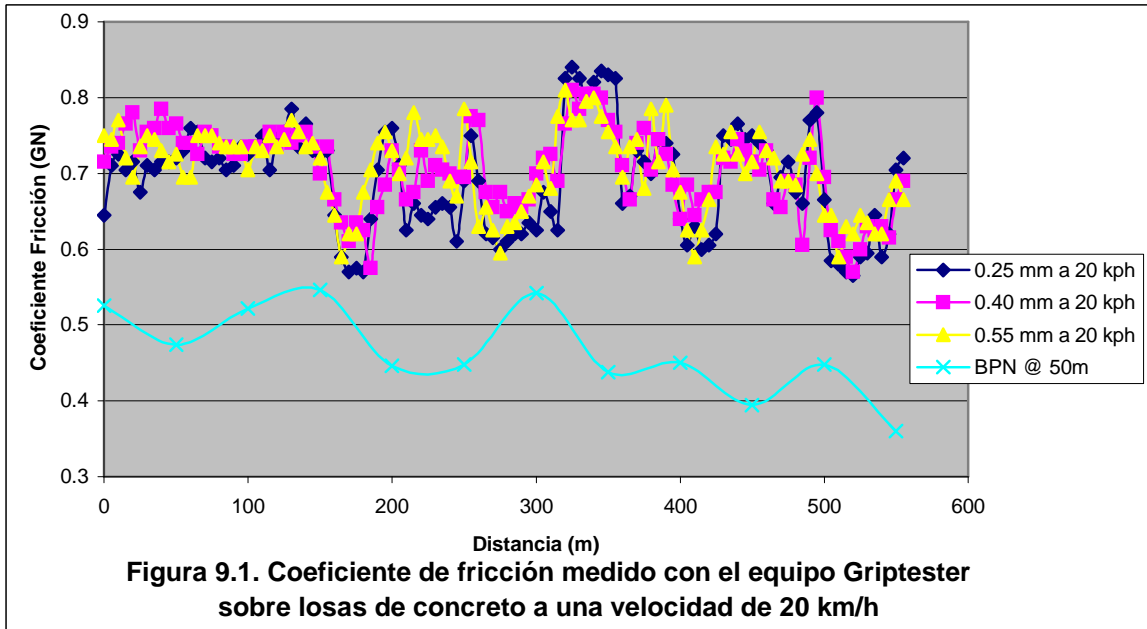
*** Para hormigón y CA de textura fina.

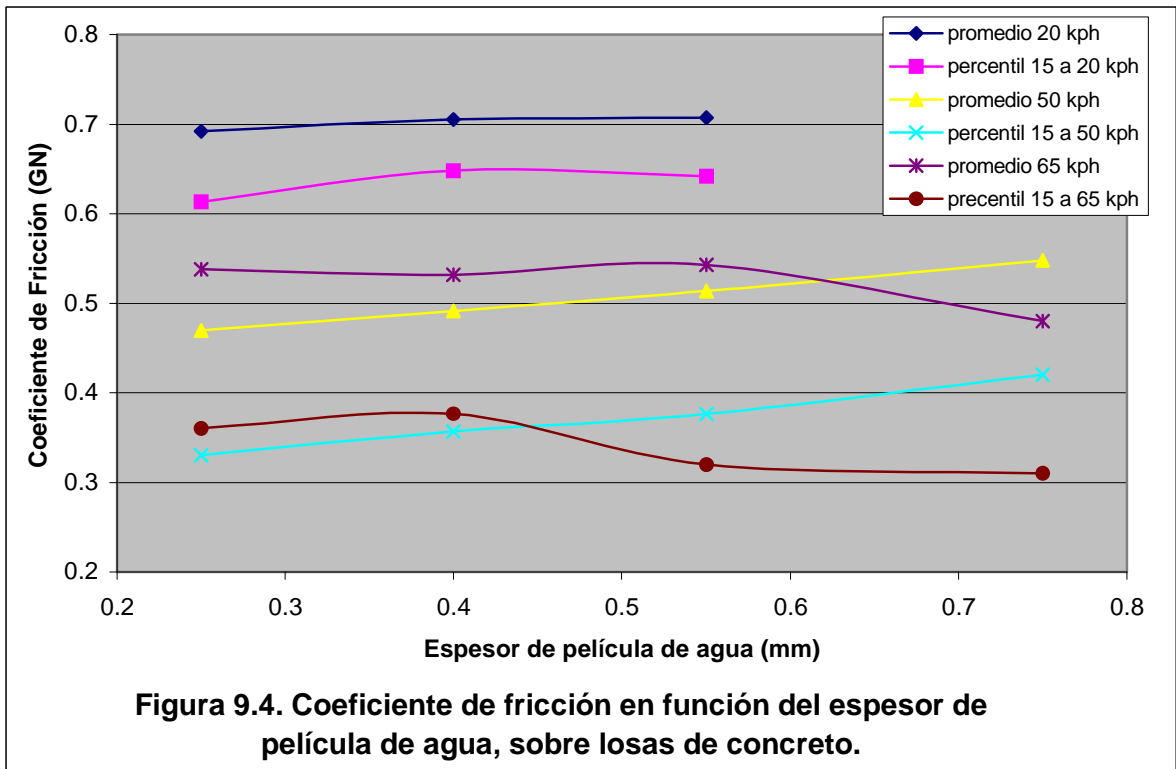
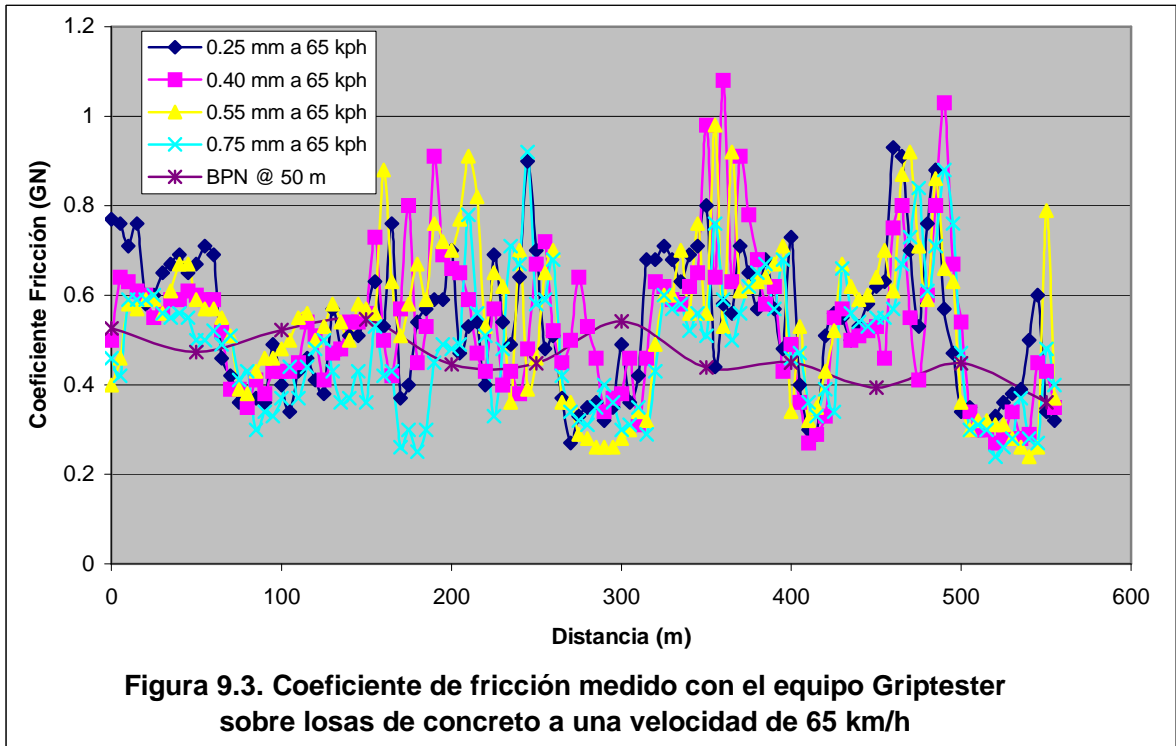
Caso 1. Superficie de losas de hormigón.

En las Figuras 9.1 a 9.3 se muestra la variación del coeficiente de fricción medido tanto con el péndulo inglés (cada 50 m) y coeficiente medido con el Griptester a una velocidad de 20, 50 y 65 kph variando el espesor de película de agua. Este es un tramo de 550 m de longitud con una macrotextura medida aplicando el método volumétrico de la mancha de arena con una altura promedio de 0.65 mm.

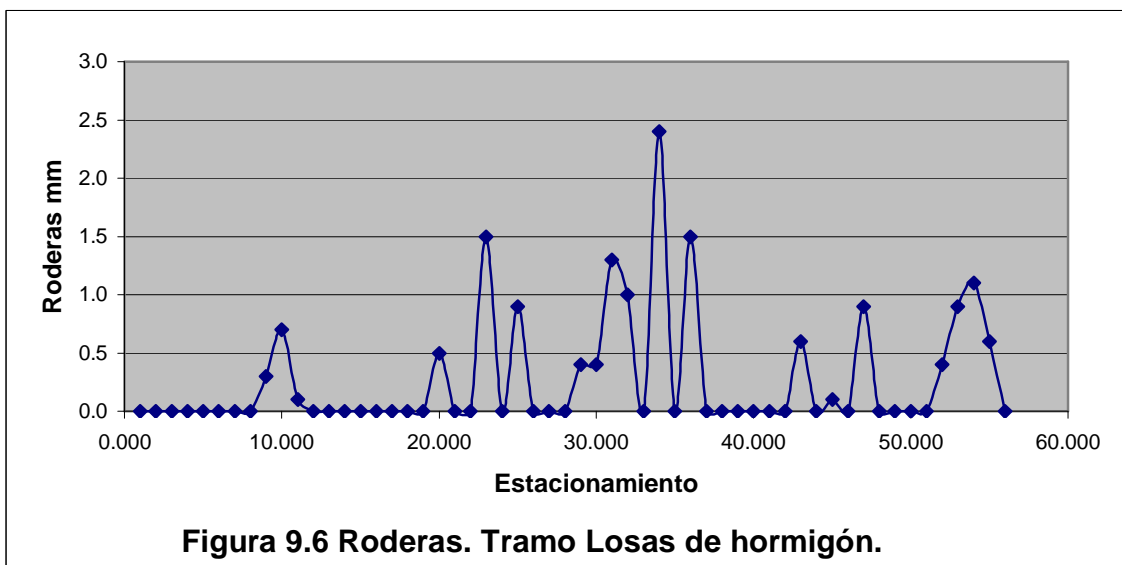
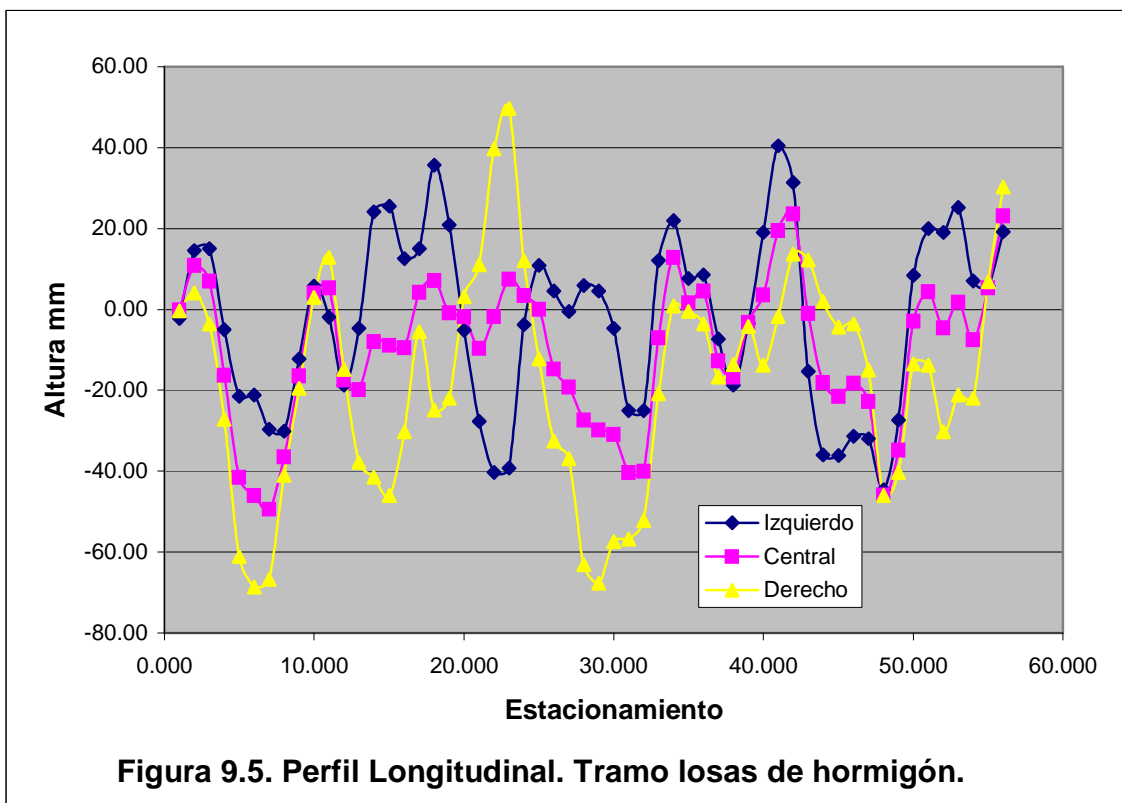
En la Figura 9.4 se observa el efecto de variar el espesor de película de agua sobre el coeficiente de fricción medido con el Griptester, a tres velocidades. Se determinó una curva promedio y una curva que representa el percentil 15, el cual considera que el 85% de los datos se encuentran por encima del valor calculado, esto por que se necesita conocer un valor mínimo de fricción y porque la variabilidad de las mediciones afecta el promedio. Puede apreciarse como a velocidades bajas una variación en el espesor de película de agua no es significativo para producir cambios en el coeficiente de fricción, de igual forma se repite el patrón para una velocidad de 50 kph con tendencia inversa a la esperada, por otro lado al medir a una velocidad de 65 kph se observa un decremento en el valor de fricción al aumentar el espesor de película de agua por encima de los 0.50 mm.

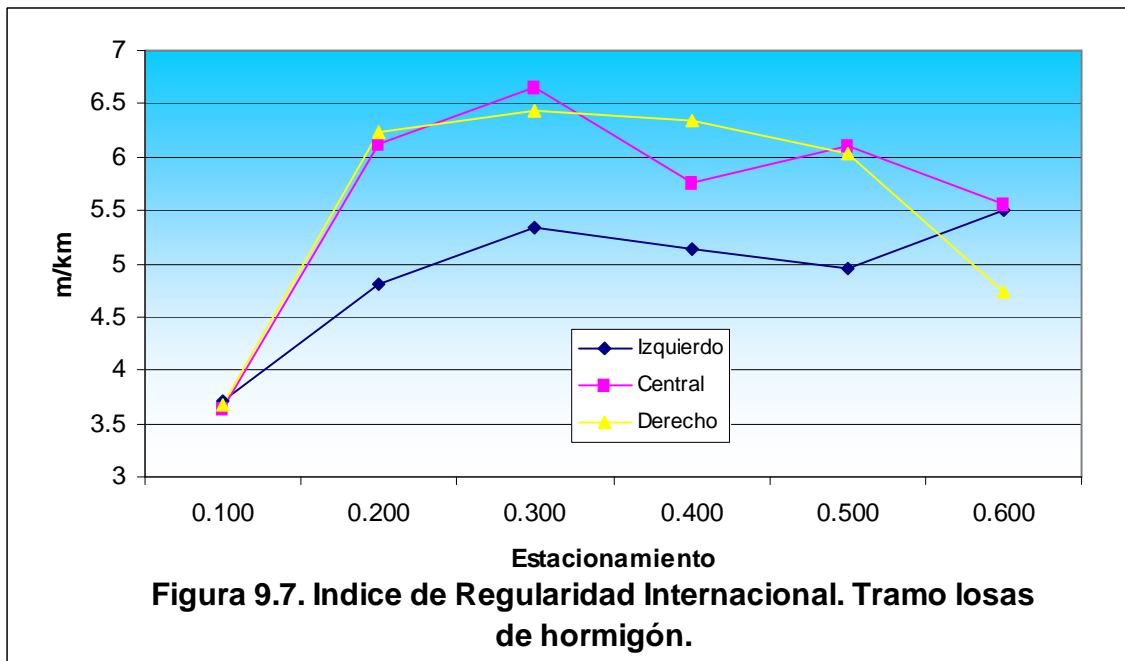
Cabe destacar que los valores de fricción medidos para este tipo de tramo de carretera son bajos en relación a los niveles de alarma establecidos en Inglaterra como se observa en las Tablas 5.9 y 5.14.





Las Figuras de la 9.5 a la 9.7 presentan información de perfil, roderas y rugosidad, respectivamente para este tramo.





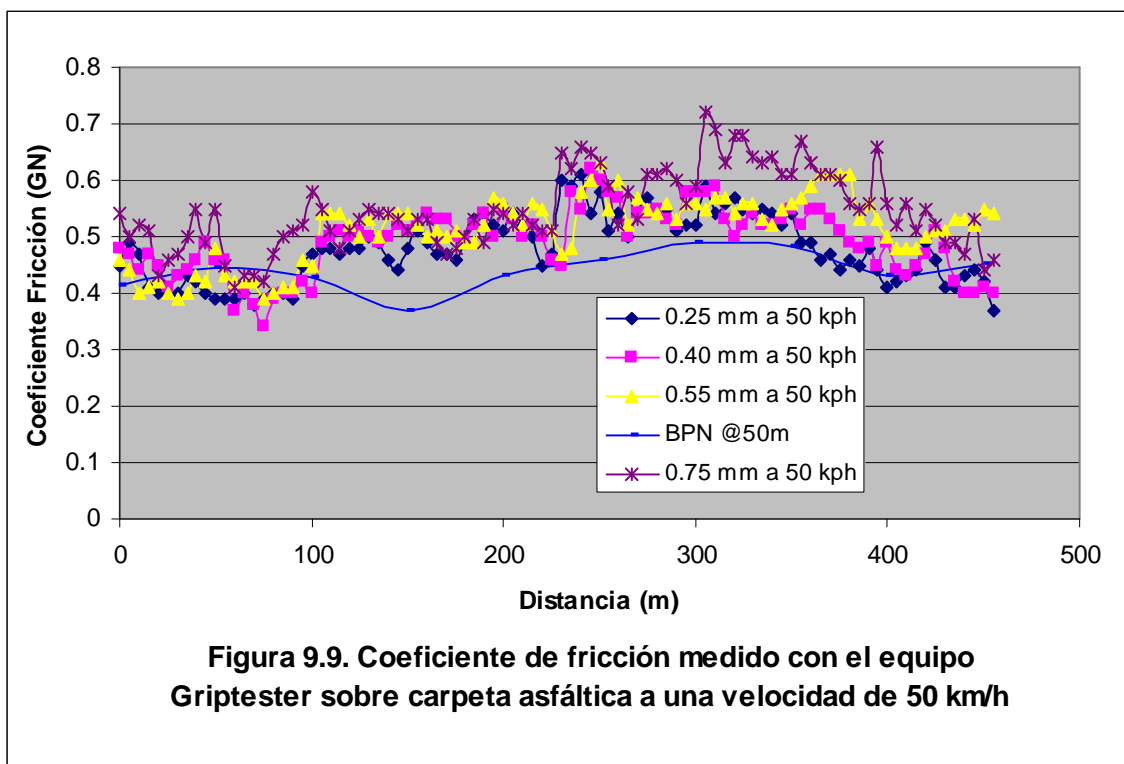
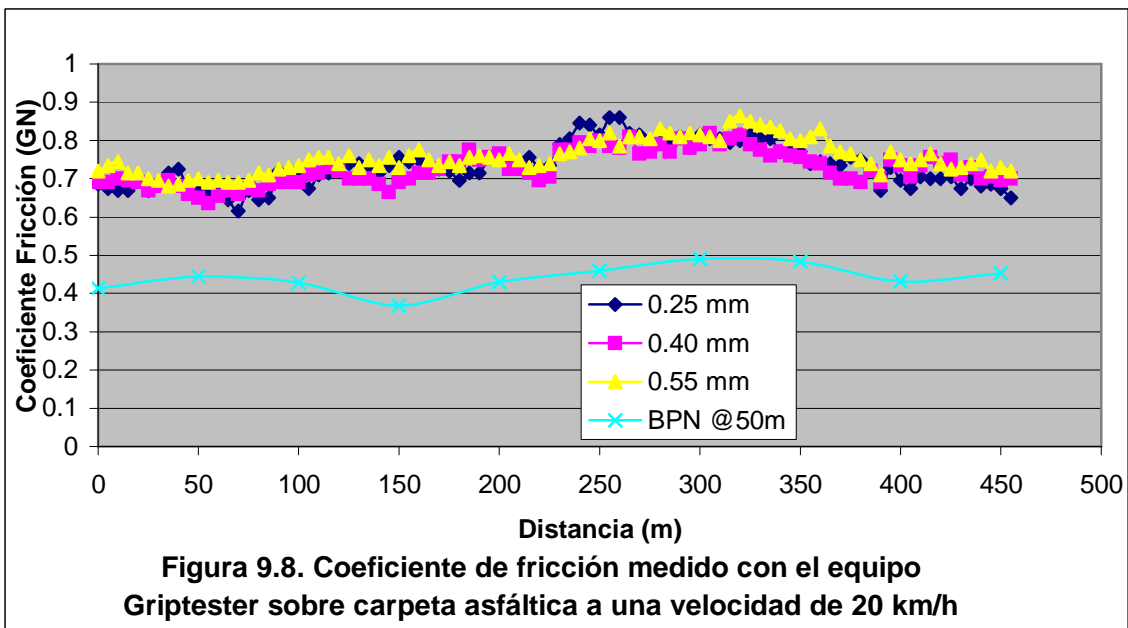
Caso 2. Superficie de concreto asfáltico de textura fina.

Este es un tramo de 450 m de longitud con una macrotextura medida aplicando el método volumétrico de la mancha de arena con una altura promedio de 0.29 mm.

En las Figuras 9.8 a 9.10 se muestra la variación del coeficiente de fricción medido tanto con el péndulo inglés (cada 50 m) y coeficiente medido con el Griptester a una velocidad de 50 kph variando el espesor de película de agua.

Al igual que el caso anterior en la Figura 9.11 se observa el efecto de variar el espesor de película de agua sobre el coeficiente de fricción medido con el Griptester, a tres velocidades. Se determinó una curva promedio y una curva que representa el percentil 15. Puede apreciarse como a velocidades bajas una variación en el espesor de película de agua no es significativo para producir cambios en el coeficiente de fricción, de igual forma se repite el patrón para una velocidad de 50 kph con tendencia inversa a la esperada, por otro lado al medir a una velocidad de 65 kph se observa un decremento en el valor de fricción al aumentar el espesor de película de agua por encima de los 0.50 mm.

Las Figuras de la 9.12 a la 9.14 presentan información de perfil, roderas y rugosidad, respectivamente.



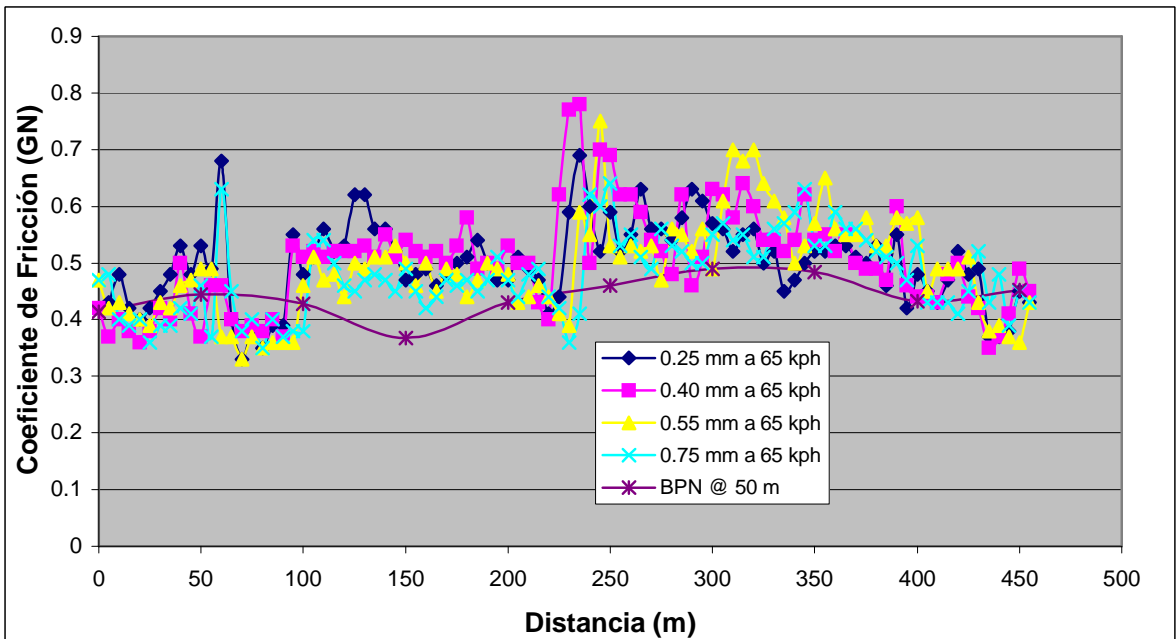


Figura 9.10 Coeficiente de fricción medido con el equipo Griptester sobre carpeta asfáltica a una velocidad de 65 km/h

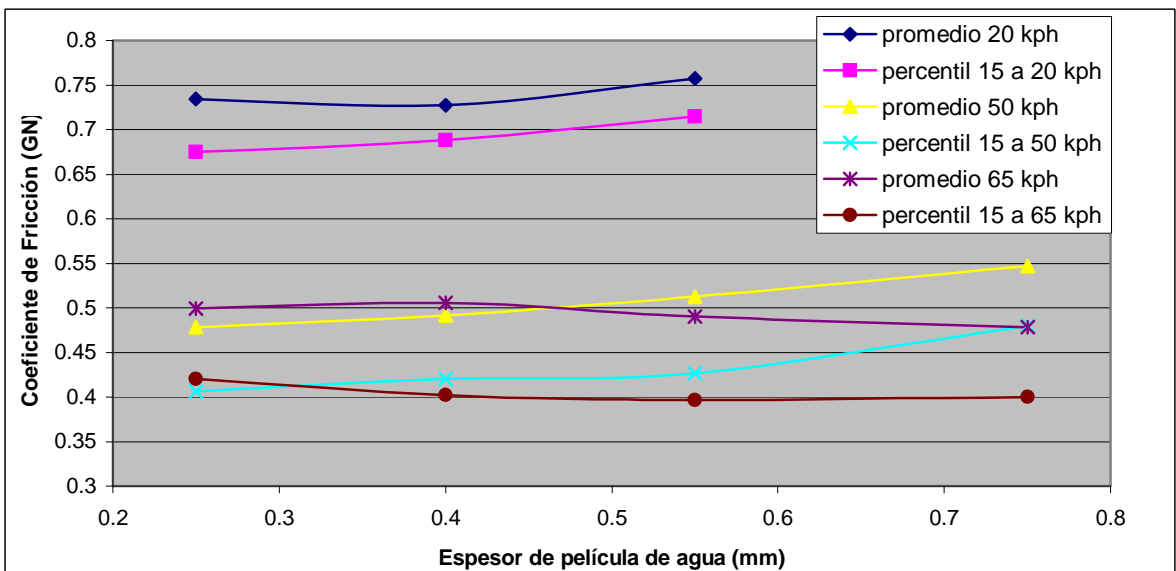
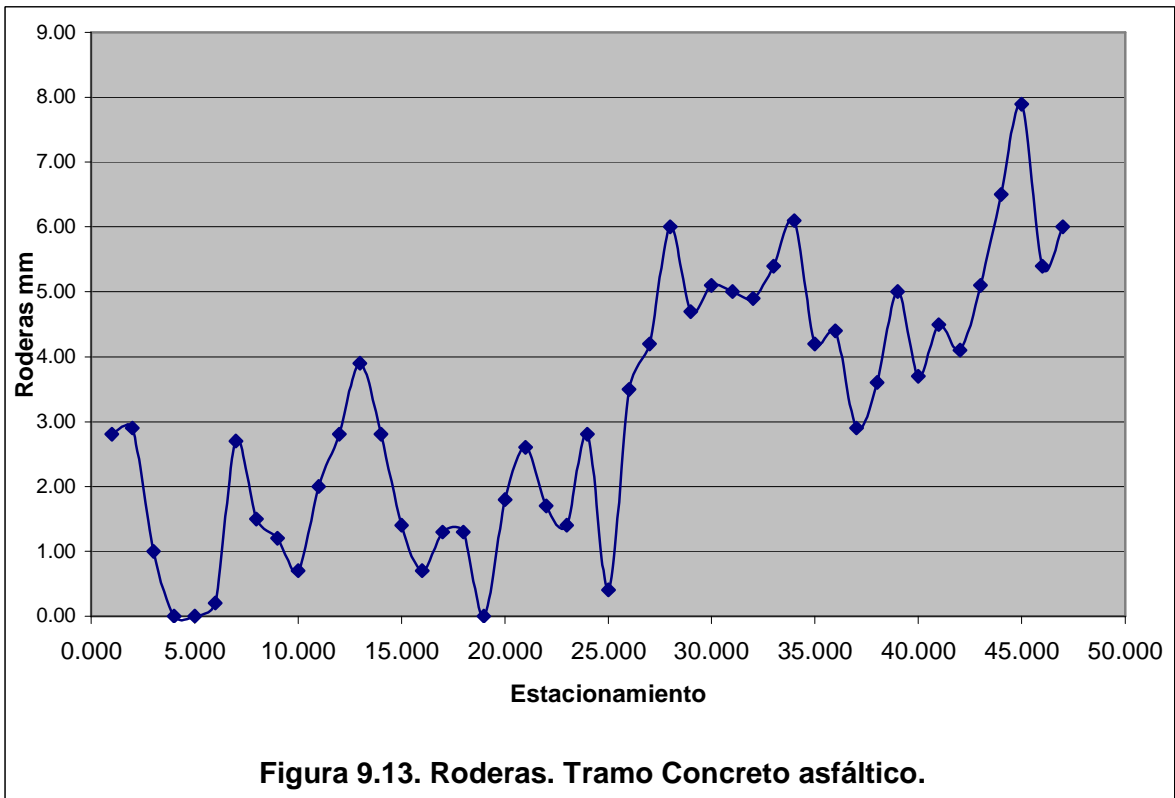
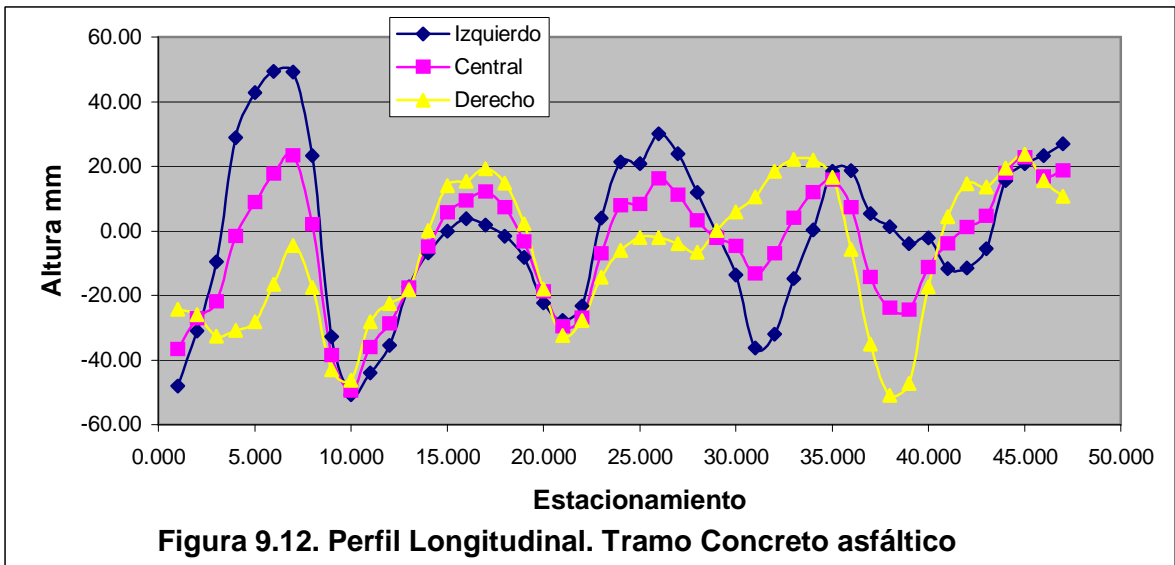
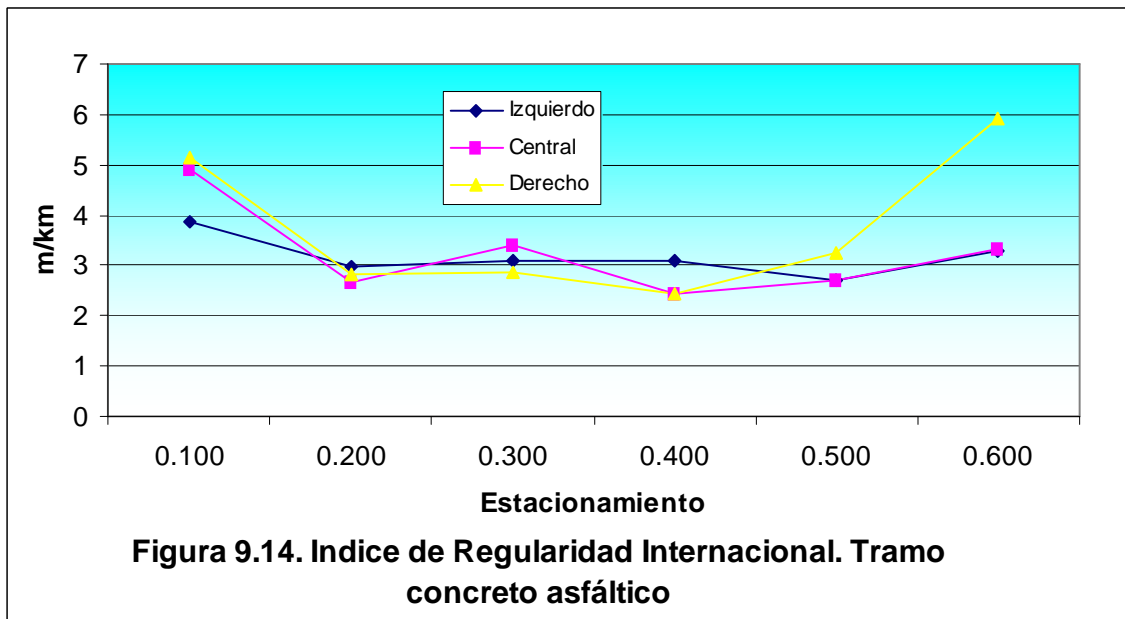


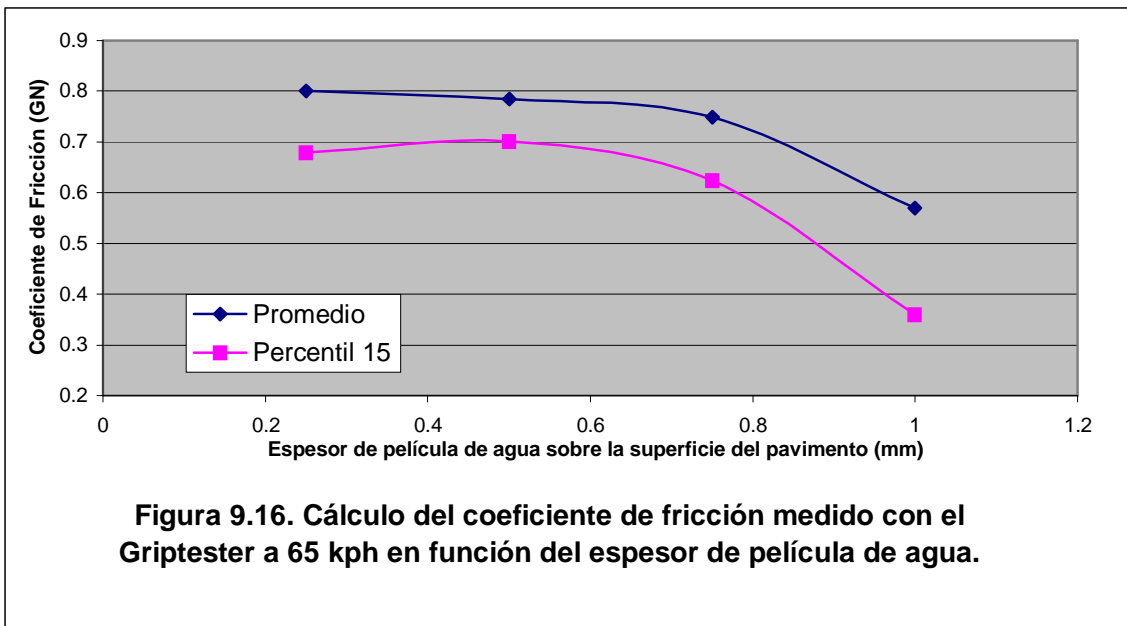
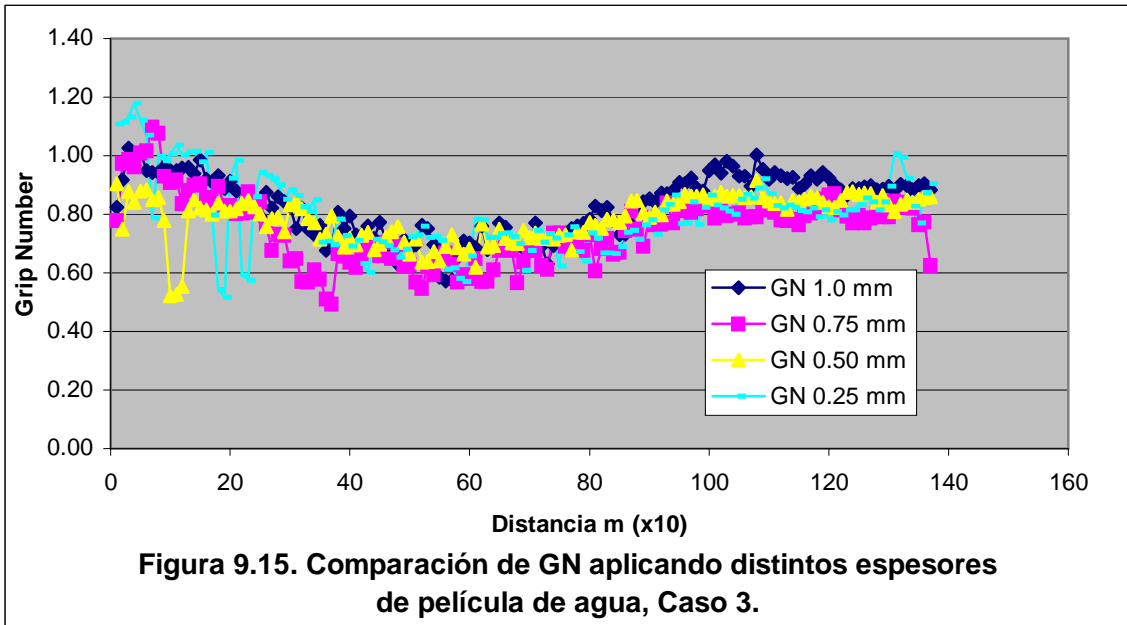
Figura 9.11. Coeficiente de fricción en función del espesor de película de agua, sobre concreto asfáltico.





Caso 3. Superficie de concreto asfáltico de textura gruesa.

Para este caso solo se cuenta con mediciones de coeficiente de fricción con el Griptester a 65 kph variando el espesor de película de agua. Las Figuras 9.15 y 9.16 muestran los resultados de coeficiente de fricción y el efecto de la variación en el espesor de película de agua, presente en un tramo de 1500 mm de longitud. En este segundo, se observa de forma más clara el efecto de aumentar el espesor de película de agua para un tramo de concreto asfáltico con alto valor de fricción y textura gruesa (la determinación de la textura fue realizado por inspección y comparación con el caso anterior).



9.2 ANÁLISIS DE VARIANZA Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS DE MEDICIÓN

En la Tabla 9.2 se muestra el resultado del análisis de varianza a un 90% de confianza efectuado considerando los tratamientos Velocidad, espesor de película de agua, tipo de pavimento y los intervalos de medición (equipo).

Con este análisis se determina que tanto la velocidad como el tipo de pavimento son elementos que causan diferencias significativas (por encima del 95% de confianza) el los resultados de coeficiente de fricción medidos con el Griptester. En menor grado el espesor de película de agua explica parte de la variabilidad observada. Por otro lado no se determinó que el intervalo de medición no afecta significativamente el valor del coeficiente de fricción medidos con el Griptester.

Con este análisis y observando las Figuras anteriores se puede decir que la velocidad es el principal factor que produce variaciones significativas en la resistencia al deslizamiento de las superficies de pavimento; un aumento en la velocidad produce un decremento el coeficiente de fricción y en este estudio se determinó una diferencia significativa en el tipo de pavimento, para losas de concreto se obtienen valores de fricción mayores que para superficies de concreto asfáltico; esto también asociado a la textura, el pavimento con mayor profundidad de textura presenta mayor resistencia al deslizamiento.

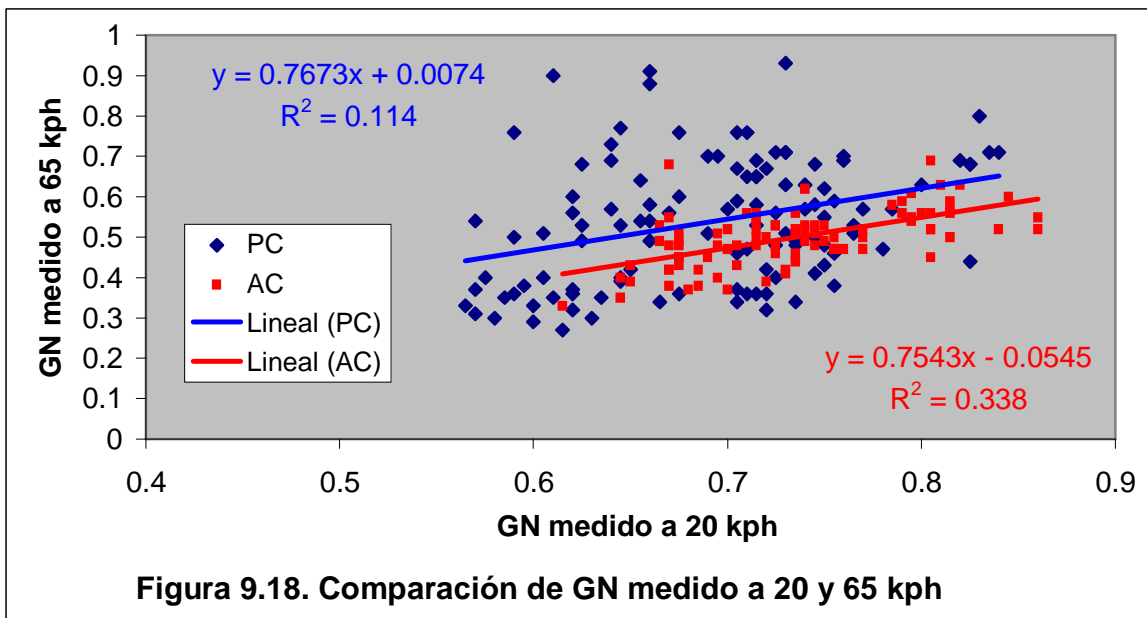
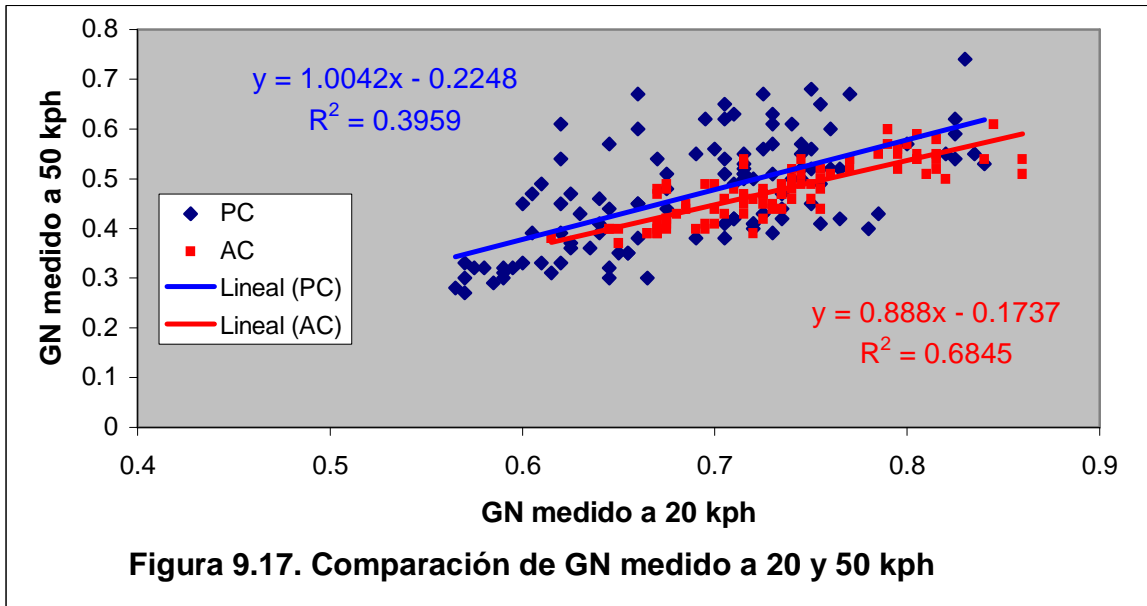
Tabla 9.2. Resultados de análisis de varianza al 95% de confianza para los casos 1 y 2.

Tratamiento	Factores	Significativo	
Velocidad	20, 50, 65 km/h	0.01	si
Espesor de película de agua	0.25, 0.4, 0.55, 0.75 mm.	0.05	si
Tipo de Pavimento	Hormigón, concreto asfáltico	0.01	si
Intervalo de medición	5 m y 10 m	0.1	no
Velocidad * Tipo		0.01	si
Velocidad * Espesor		0.021	si
Espesor * Tipo		0.02	si

En las Figuras 9.17 y 9.18 se muestra la relación encontrada entre el coeficiente de fricción medido con el Griptester a una velocidad de 20 kph con respecto al coeficiente medido a 50 y 65 kph, tanto para el caso de losas de concreto hidráulico y pavimentos de concreto asfáltico.

Se observa en las Figuras 9.17 y 9.18 como correlacionan mejor los coeficientes de fricción medidos sobre concreto asfáltico. De igual forma se aprecia como la alta

dispersión en los resultados obtenidos al medir sobre las losas de hormigón afectan de gran forma la correlación del coeficiente de fricción medido a diferentes velocidades.

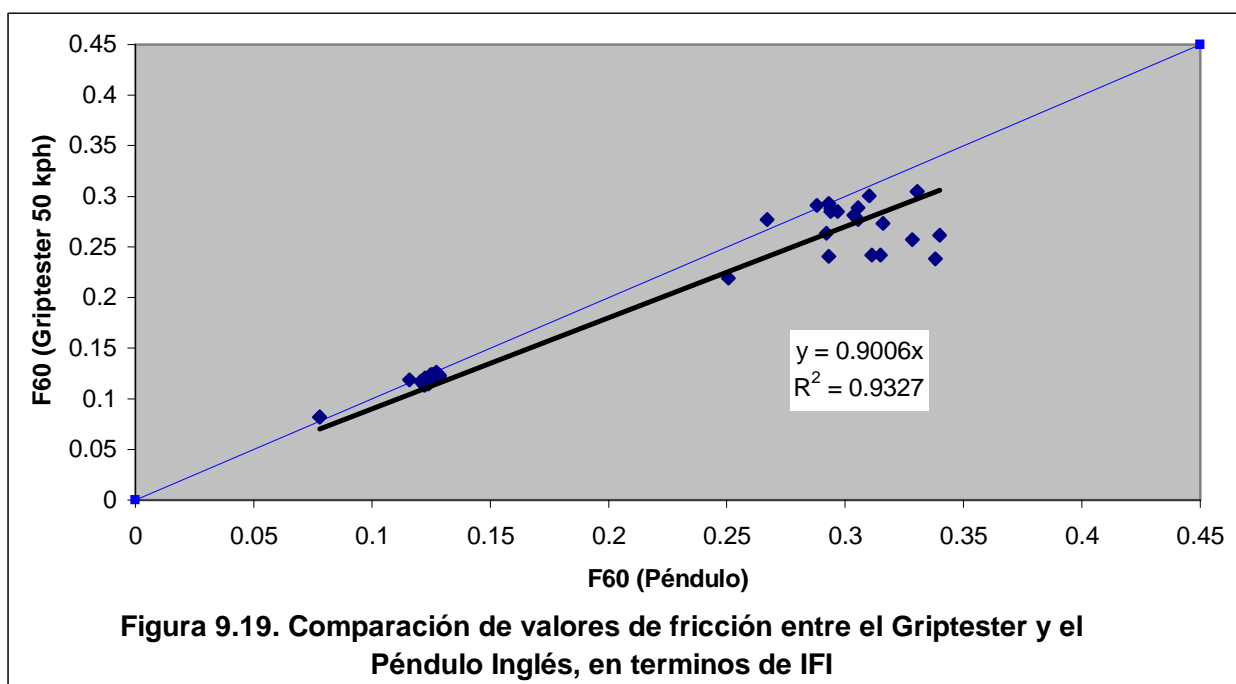


En la Figura 9.19 se muestra la comparación del Índice de Fricción Internacional (IFI) calculado a partir de los valores de coeficiente de fricción promedio (en tramos de 100 m de longitud) medidos con el Griptester a 50 kph versus el IFI calculado a partir del valor de fricción medido con el Péndulo Inglés. Los valores de fricción bajos corresponden a los medidos sobre concreto asfáltico y los valores de fricción altos y dispersos corresponden a los medidos sobre losas de hormigón.

En esta figura se observa la buena correlación que existe entre los valores de IFI calculados. La línea azul representa la equidad de valores de fricción calculados y aplicando la metodología establecida por la PIARC con una variación encontrada en México para el péndulo inglés en los valores A y B de la ecuación de armonización, como se observa en la Tabla 9.3.

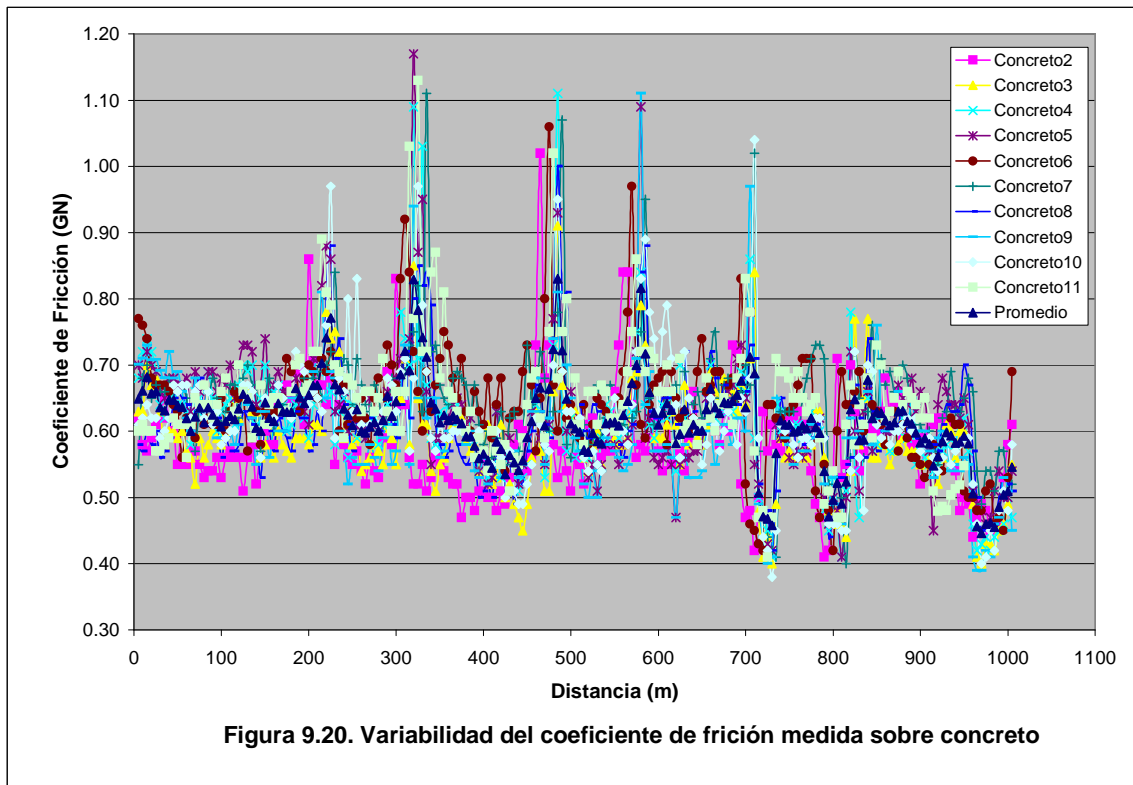
Tabla 9.3 valores de constantes A y B para cálculo de F60

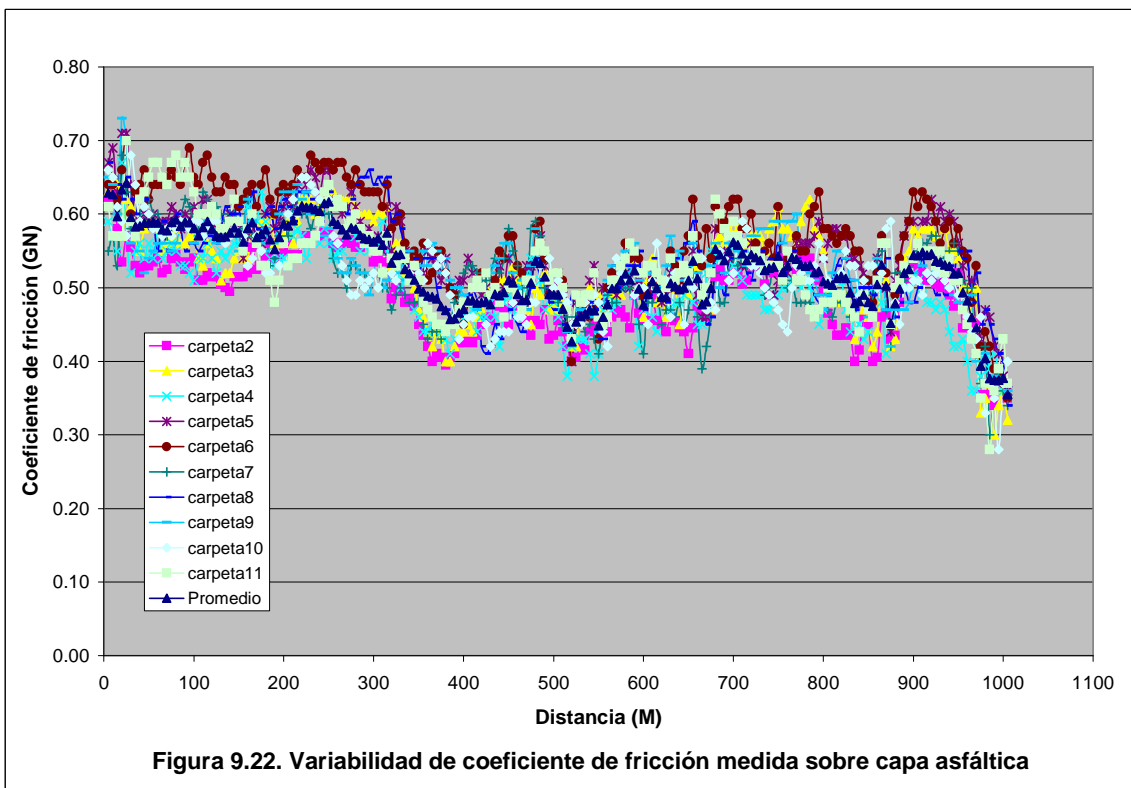
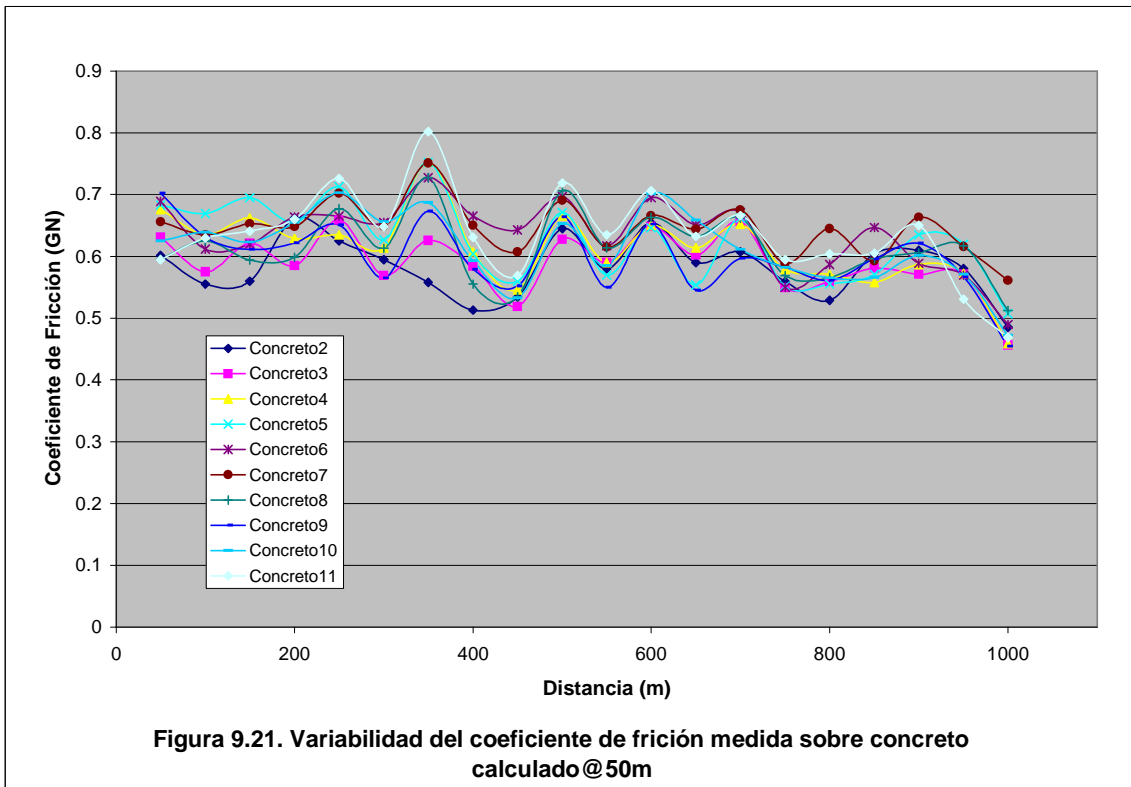
Dispositivo	S (km/h)	A	B
Griptester (UK)	9.4	0.082	0.910
Péndulo Inglés	10	0.078	0.01071

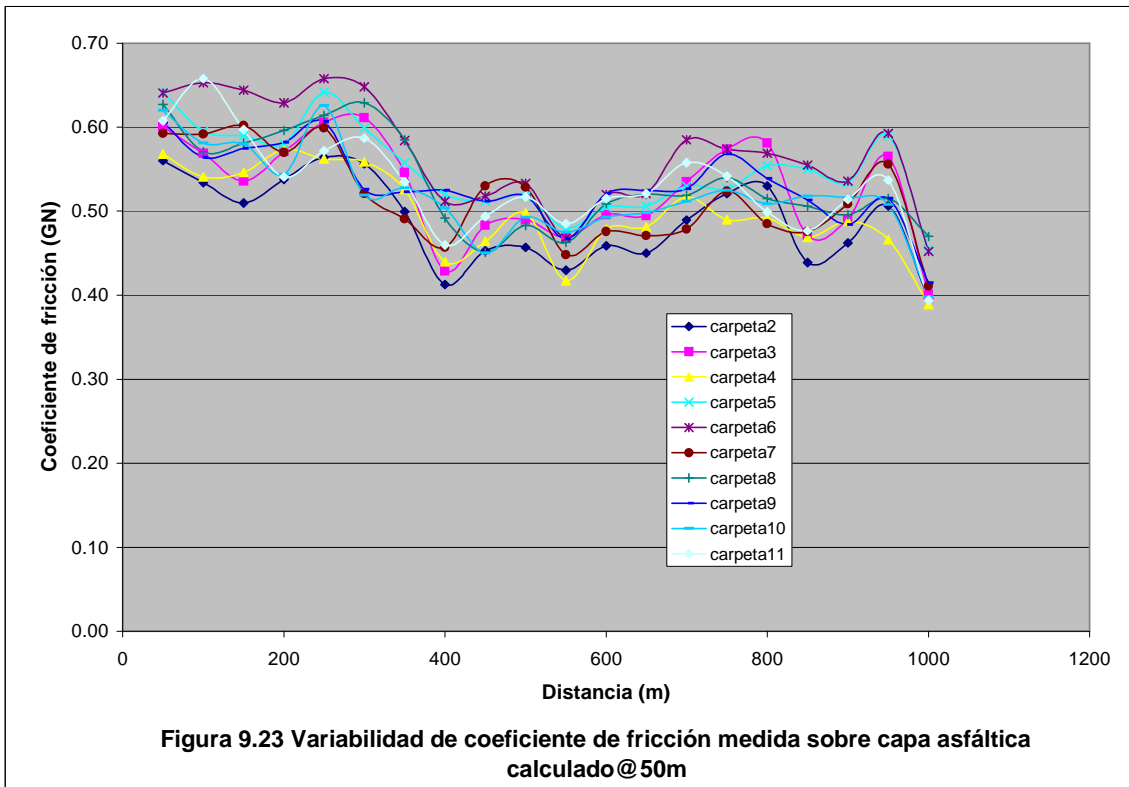


En las figuras de la 9.20 a 9.23 se presentan resultados de análisis de incertidumbre del ensayo realizado a una velocidad de 50 km/h, un espesor de película de agua de 0.25 mm y a 2 intervalos de medición 5 y 50 m, tanto sobre mezcla asfáltica como sobre losas de concreto hidráulico. El valor empleado para verificar la variabilidad es el promedio de las

desviaciones estándar para 10 replicas del ensayo sobre la misma zona, que siguiendo el orden de la figuras resulta. 0.06, 0.03, 0.04 y 0.03, obteniéndose una menor variabilidad al obtener un valor promedio de GripNumber para intervalos de medición de 50 metros, y menor en el caso de pavimentos flexibles.







9.3 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS BASADO EN NORMA BS 7941-2:2000

Método de ensayo para la medición de la resistencia al deslizamiento usando el GripTester.

Cuando sea posible la superficie a medir debe estar libre de agua estancada, congelada, libre de aceites o grasas y sin contaminación.

El sistema de alimentación hidráulica debe fijarse para proveer el flujo de agua requerido. Con el flujo de agua se asegura primero, el espesor de película de agua necesario para la medición, y segundo limpieza de la superficie. En la Tabla 9.4 se muestra la relación de flujo de aplicación, velocidad de medición y espesor de película de agua. La temperatura del agua no debe ser menor de 5 °C y no superar los 25 °C.

Tabla 9.4. Flujo de agua depositado (lt/min)

Velocidad (km/h)	Espesor de película de agua teórico (mm)	
		0.25
20	4.2	
50	10.4	

Antes del primer ensayo, se debe revisar el sistema de medición, para ver si se ha estabilizado. Esto debe hacerse encendiendo el equipo 5 minutos antes de ponerlo en movimiento y se debe comenzar la medición después de al menos 500 m con el sistema de alimentación de agua encendido. En lo posible, esta superficie de prueba debe ser representativa del tramo por medir.

Con el sistema en funcionamiento se debe fijar la velocidad de acuerdo con los estándares establecidos para medición sobre carreteras: (20 ± 5) , (50 ± 5) kph.

El sistema de recolección de datos debe ser capaz de captar los valores de fricción con intervalos de medición de 5.0 m.

10. ESTUDIO DE CAMPO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN RUTAS NACIONALES DE COSTA RICA

Luego del análisis de la metodología de medición del coeficiente de fricción se procede a realizar ensayos en diferentes rutas de la red vial nacional. Estas rutas fueron seleccionadas tomando en cuenta que el Griptester es un equipo pequeño y delicado, por lo tanto este debe circular sobre una superficie de ruedo en buen estado; se seleccionaron tramos a lo largo de todo el país con el criterio de contar con un IRI inferior a 4.

En la Tabla 10.1 se muestra una clasificación de la condición superficial respecto al deslizamiento y a seguridad vial, obtenida a partir de referencia internacional relacionada con el coeficiente de fricción transversal y del Griptester, además a partir del riesgo medio de accidentalidad de Gran Bretaña; es así como en las Figuras 10.1 y 10.2 se muestra la distribución porcentual de el total de tramos evaluados. En la Figura 10.3 se muestran los tramos individuales con su respectivo resultado, reflejo de la clasificación.

Por otro lado dentro de esta evaluación se tiene la información de resistencia al deslizamiento de capas de rodado nuevas, alrededor de 8 km obtenidos de sobrecapas y capa de rodadura asfáltica nueva, seleccionado de tal forma que se cumpla la mínima dispersión en la velocidad a la hora de realizar el ensayo, así se esta forma se establece una especificación de recepción de nuevas obras mostrado en la Tabla 10.2, junto con la anterior normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento o el nivel de lisura superficial de los pavimentos.

En los Anexos se pueden apreciar el estado de algunas rutas en formato de mapa, dado que el equipo de medición permite ubicar geo-espacialmente el punto donde se realiza la evaluación; una práctica muy conveniente en la administración de carreteras. Algunos de los colores han sido cambiados para una mejor visualización.

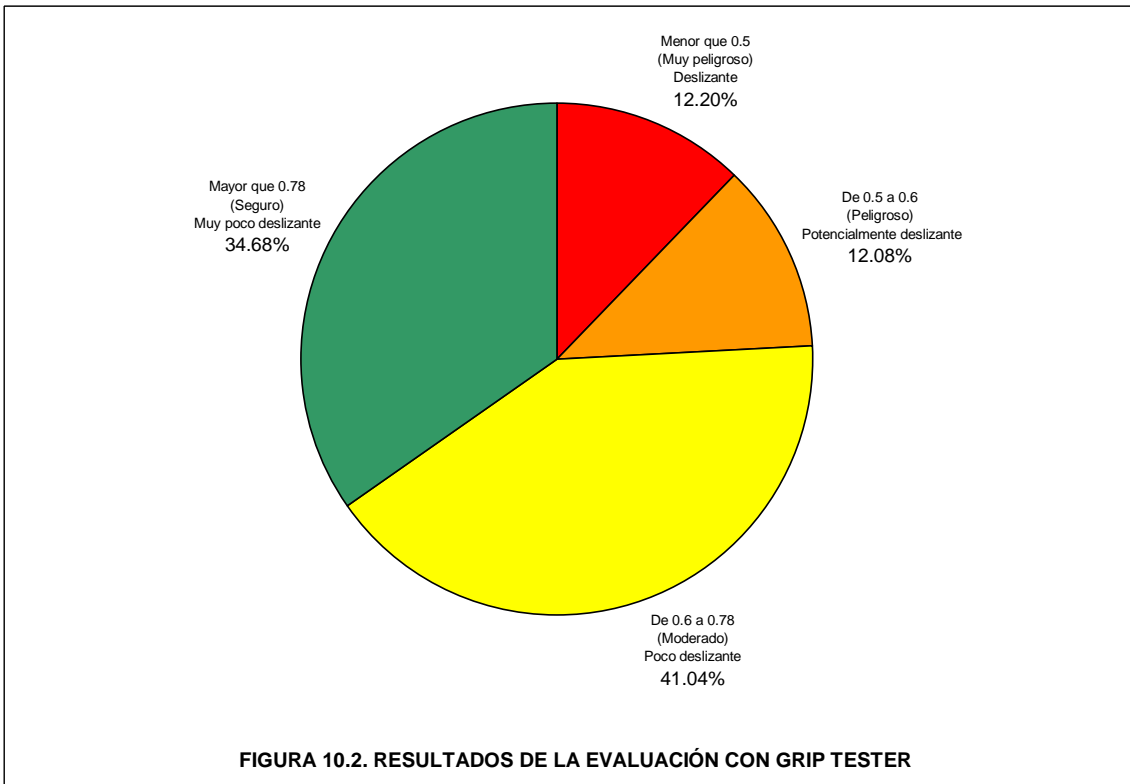
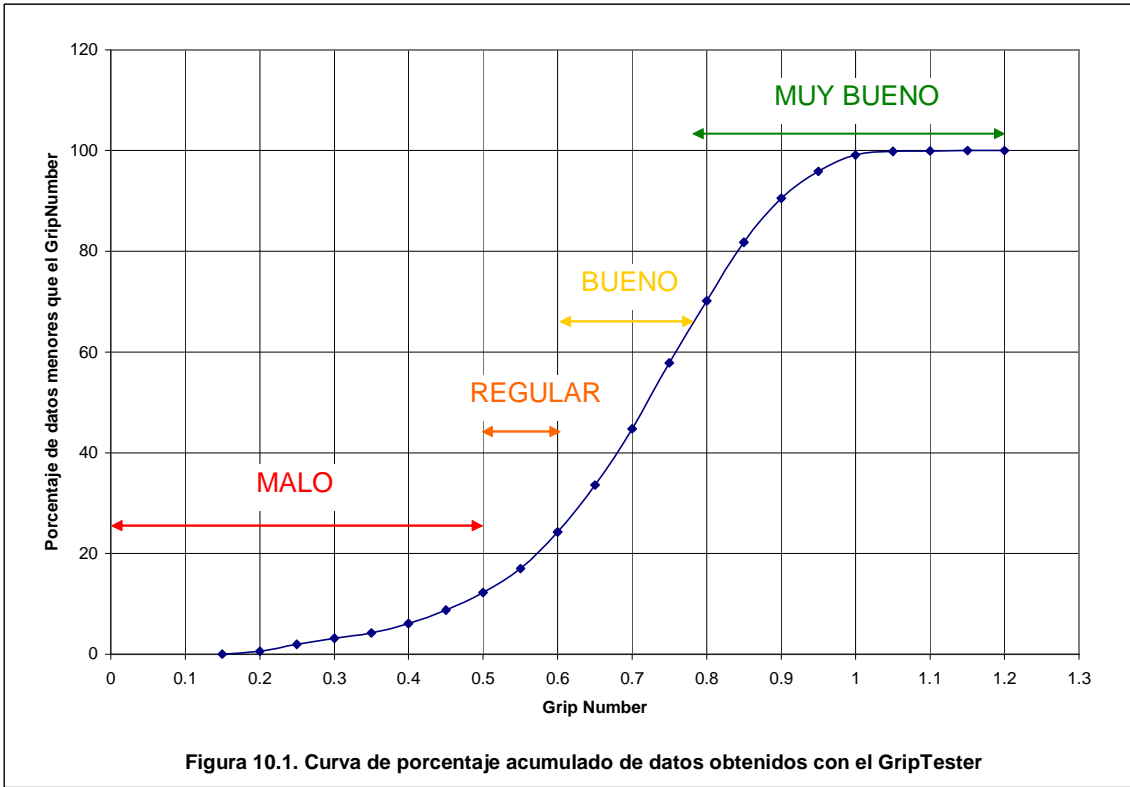
Tabla 10.1. Clasificación del pavimento según el Grip Number

Coeficiente de fricción Transversal (CFT) medido con SCRIM*	Valor de Grip Number	Condición	Nivel			Tipo de pavimento evaluado	Porcentaje evaluado*** (%)
			Deslizamiento	Peligrosidad	Riesgo medio de accidentalidad **		
Menor a 0.36	menor a 0.5	Malo	Deslizante	Muy peligroso	mayor a 20	Pavimento flexible compuesto de agregado calizo	12.2
0.36 a 0.45	0.5 a 0.6	Regular	Potencialmente deslizante	Peligroso	16 a 20	Pavimento flexible con alto grado de exudación y pérdida de textura	12.1
0.45 a 0.60	0.6 a 0.78	Bueno	Poco deslizante	Moderado	10 a 16	Pavimento rígido y flexible con buena textura	41.0
Mayor a 0.60	mayor a 0.78	Muy Bueno	Muy poco deslizante	Seguro	menor a 10	Pavimento nuevo o sobrecapas	34.7

(*) Valores obtenidos de especificaciones de Países europeos como: Gran Bretaña, Países Bajos y Austria.

(**) Número de accidentes por cada millón de vehículos kilómetros en función del coeficiente de fricción, obtenidos en Gran Bretaña, según memorias del 5to Simposio de Características Superficiales de Pavimentos SURF 2004, Toronto, Canadá.

(***) La evaluación se realizó en el período comprendido entre diciembre del 2004 y enero del 2005. El ensayo para la evaluación se realizó a una velocidad de 50 km/h, con un espesor de película de agua de 0.25 mm y un intervalo de cálculo del GripNumber cada 20 m.



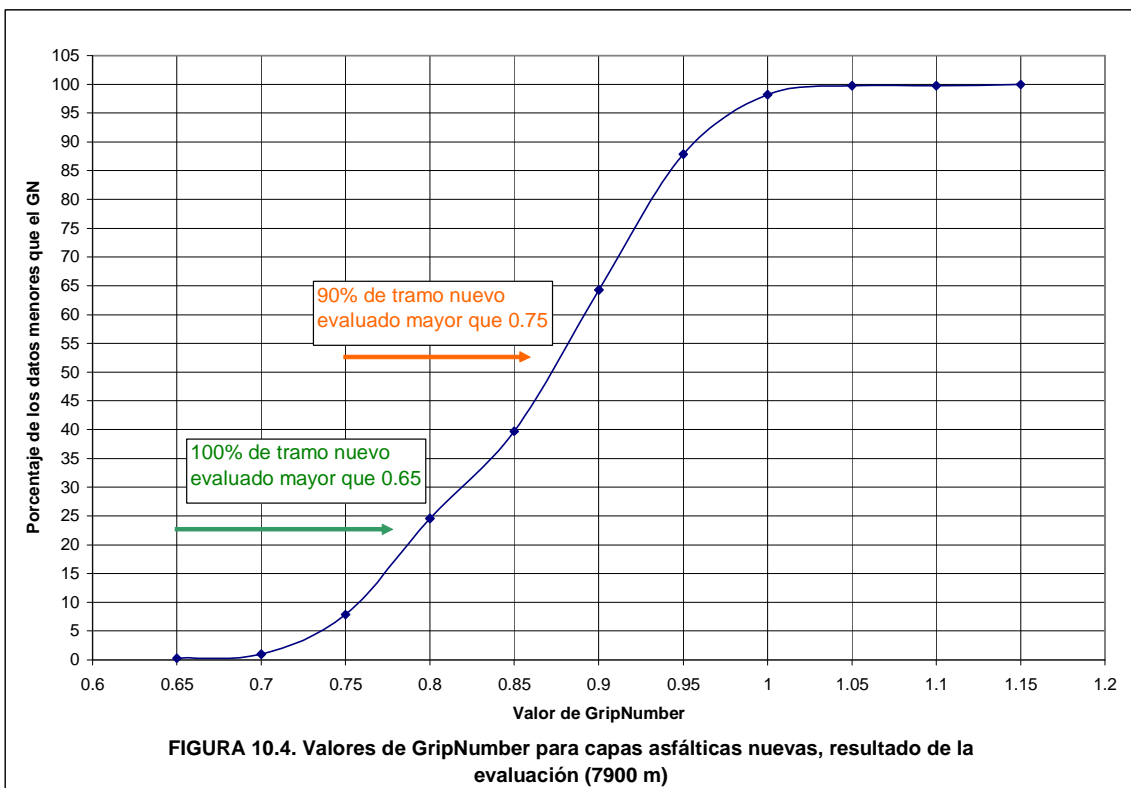
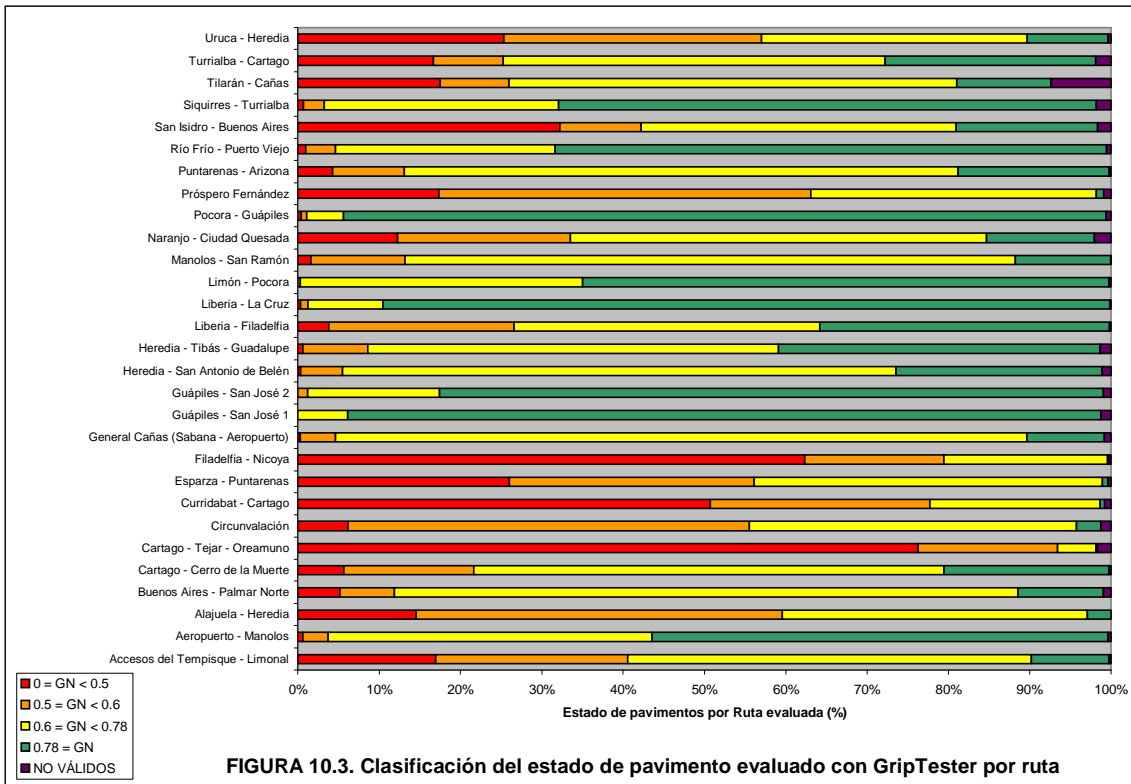


Tabla 10.2. Propuesta de normativa para evaluar la lisura superficial de los pavimentos

Categoría	Deslizamiento	Peligrosidad	Rango
Malo	Deslizante	Muy peligroso	Menor que 0.5
Regular	Potencialmente deslizante	Peligroso	De 0.5 a 0.6
Bueno	Poco deslizante	Moderado	De 0.6 a 0.78
Muy Bueno	Muy poco deslizante	Seguro	Mayor que 0.78
90 % capa de rodamiento nueva			Mayor que 0.75
100 % capa de rodamiento nueva			Mayor que 0.65

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha encontrado que las mediciones de resistencia al deslizamiento realizadas con el GripTester suelen ser muy sensibles a la velocidad y al estado superficial de la carretera, con forme aumenta la velocidad la resistencia tiende a disminuir y a mayor regularidad superficial se obtiene una mayor resistencia al deslizamiento que es aparente y se une a la disminución de velocidad para evitar el maltrato del equipo.

Cabe destacar que esta evaluación fue realizada en un período del año de transición entre el invierno (caracterizado por la lluvia en un país tropical) y el verano, falta determinar el efecto de la variación estacional a lo largo del año para determinar la condición más crítica, que produce la menor resistencia al deslizamiento.

Con forme se vaya aumentando la base de datos de mediciones, será más confiable la clasificación brindada en este artículo y la especificación para recepción de nuevas obras.

Cabe destacar que el Griptester ha sido uno de los equipos considerados en el proceso de armonización realizados por la PIARC en Europa, por lo que los resultados aquí mostrados deberán ser actualizados al Índice de Fricción Internacional (IFI), una vez que se cuente con un equipo de medición de textura continuo, que complete la especificación en términos de macrotextura.

Se recomienda que para recepción de superficies de rodado nuevas, se aplique la especificación propuesta para tramos de 1 kilómetro de longitud, con lo cual el cumplimiento se debe dar para cada kilómetro del proyecto evaluado.

En el ensayo con Griptester debe asegurarse una velocidad de 50 ± 10 km/h, se debe indicar las zonas y los motivos del no cumplimiento de esa velocidad. El intervalo de medición puede establecerse para proyectos de 10m y para evaluación de 20 m.

El siguiente paso es establecer una normativa en función del Índice de Fricción Internacional (IFI), para lo cual se puede considerar normativa para macrotextura como la que se muestra en la Tabla 11.1, solamente que aplicado a superficies de ruedo nuevas en nuestro país.

Tabla 11.1 Normativa internacional y valores medidos para capas de rodadura nuevos, medidos con la prueba de la mancha de arena

España	
Capa asfáltica	0.7
Concreto hidráulico	0.7 - 1.0
Tratamiento superficial Textura fina	0.6
Tratamiento superficial Textura media	0.8
Tratamiento superficial Textura gruesa	1.0
Inglaterra	
Capas asfálticas	1.5
Concreto hidráulico	1.0
Argentina	
Superficie de ruedo	0.8 - 1.0
Valores de capa de ruedo asfáltico nuevas (EUA)	
SMA	0.6 - 1.2
OGFC	1.5 - 2.5
TS	1.0 - 3.0
Mezcla convensional (densa)	0.4 - 0.6

Una vez determinada la especificación para textura, se procede a especificar el IFI, por ejemplo si tenemos que todo tramo nuevo debe cumplir el 100% con un valor de GripNumber por encima de 0.65, esto implica un F60 igual a 0.36 y suponiendo un valor de macrotextura de 1.0 mm mínimo se tendría Sp igual a 102 km/h. La expresión en términos de IFI sería (F60, Sp) = (0.36, 102), valor que debe cumplirse sin importar el equipo de medición de fricción que se utilice.

Por otro lado, el expresar una especificación en términos del IFI nos permite aplicar la experiencia mexicana en cuanto a valoración del parámetro que está afectando la resistencia al deslizamiento, tanto para recepción de obras nuevas como para evaluación de la condición. En la siguiente figura se observa como para una especificación del tipo (F60, Sp) = (0.36, 102), se tendría una curva límite de aceptación por fricción y una línea vertical límite para macrotextura (1.0 mm), con lo cual se estaría aceptando la nueva capa de rodamiento si todos los valores medidos se ubican en el cuadrante II.

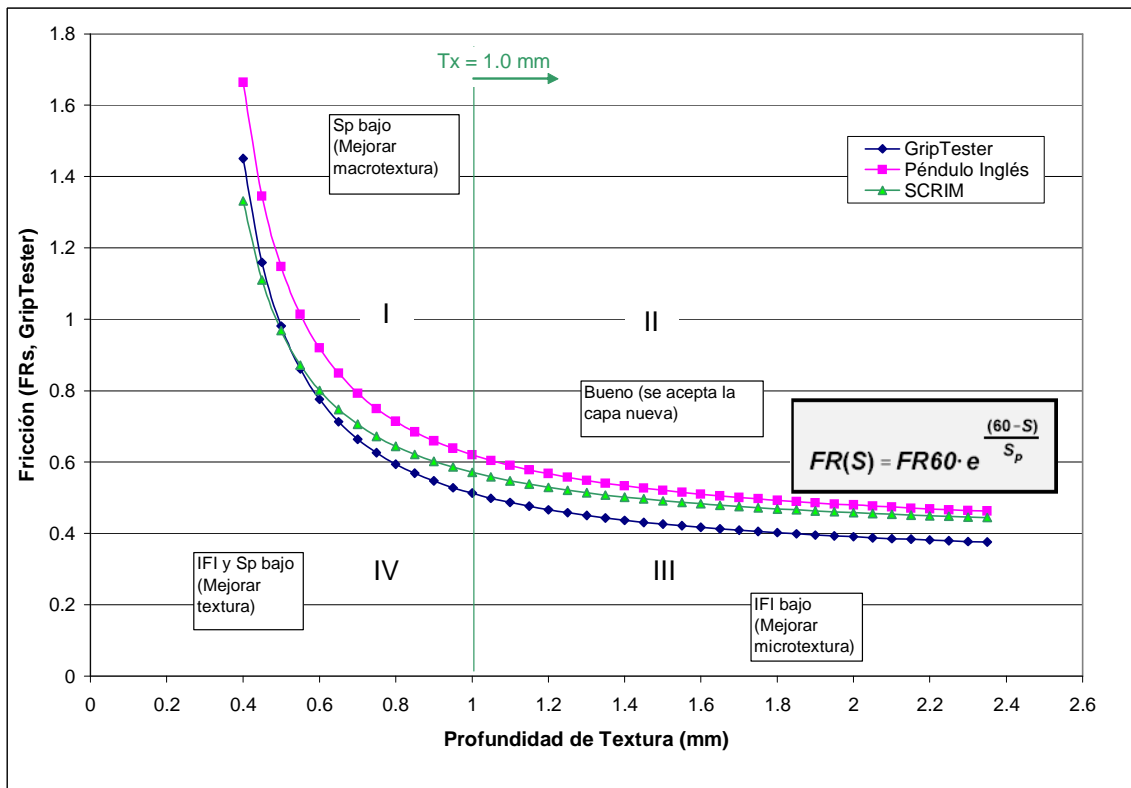


Figura 11.1. Ejemplo de especificación por Índice de Fricción Internacional - Diagrama de Fricción vs. Macrotextura, Aplicación GripTester, Péndulo Inglés y SCRIM.

11. Referencias bibliográficas

Memorias del 5to Simposio de Características Superficiales de Pavimentos SURF 2004, Toronto, Canadá.

CATALINA ARANCIBIA GALEA, ESTUDIO DE FRICCIÓN EN PAVIMENTOS. Universidad Técnica Federico Santa María. Memoria para optar al Título de: INGENIERO CIVIL. Abril 2003.

Ramón Crespo del Río. EL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL (IFI). OBTENCIÓN Y APLICACIONES. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España. 1999.

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL EN CARRETERAS DE MÉXICO. Publicación Técnica No. 170, Sanfandila, Qro, 2001

7. ANEXOS

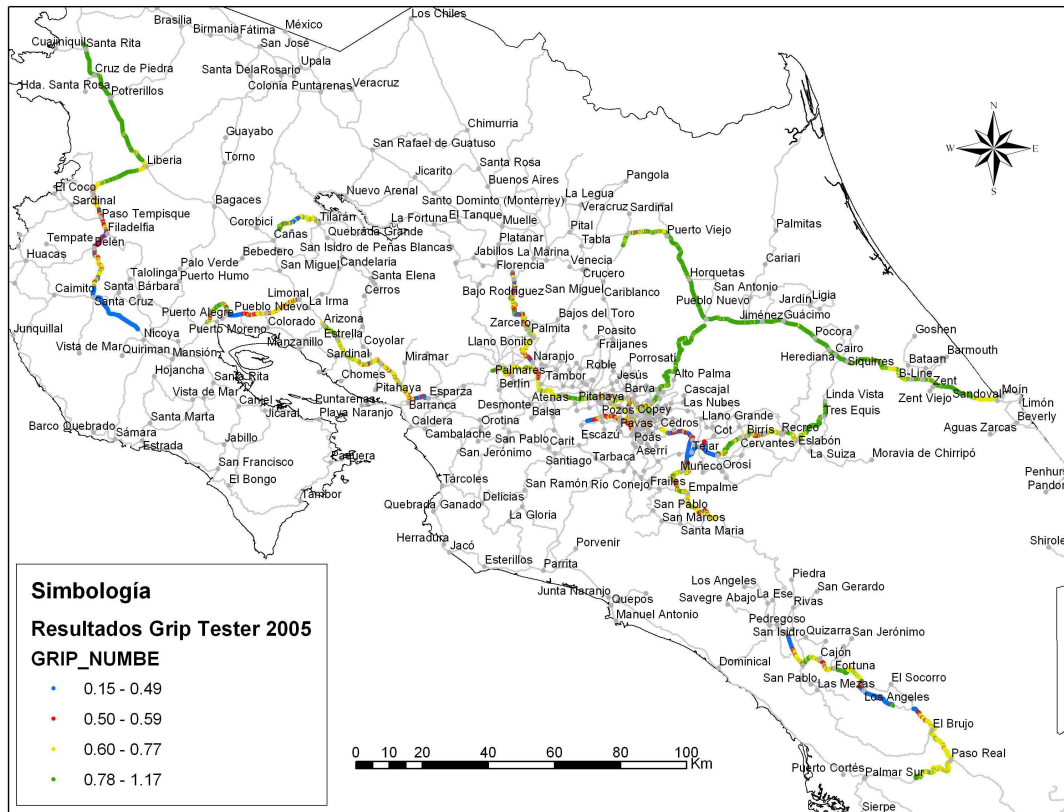


Figura A. Mapa de Costa Rica con las rutas evaluadas

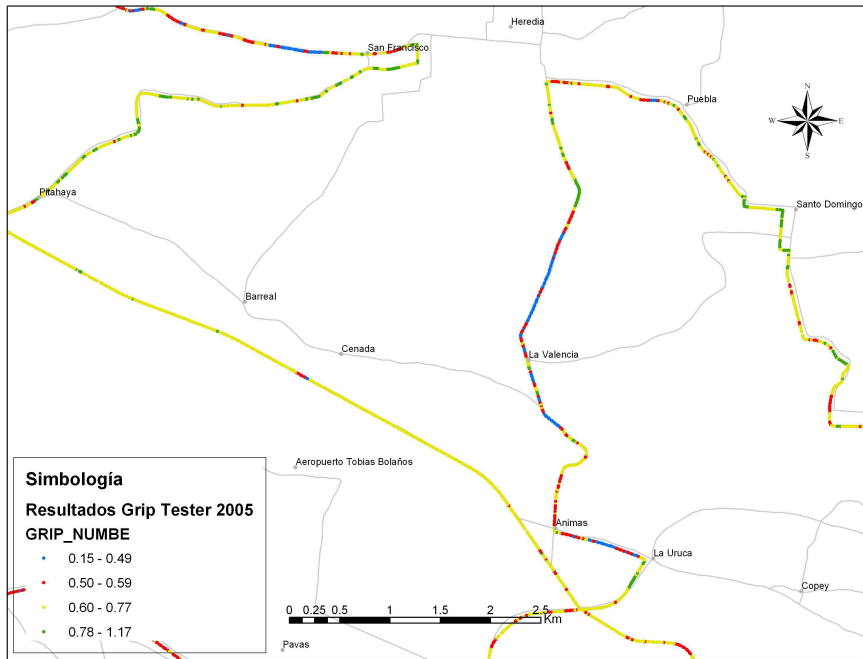


Figura B. Tramo de ruta 1 (General Cañas), ruta 3 (Uruca – Heredia) y Ruta 5 (Heredia – Santo Domingo).

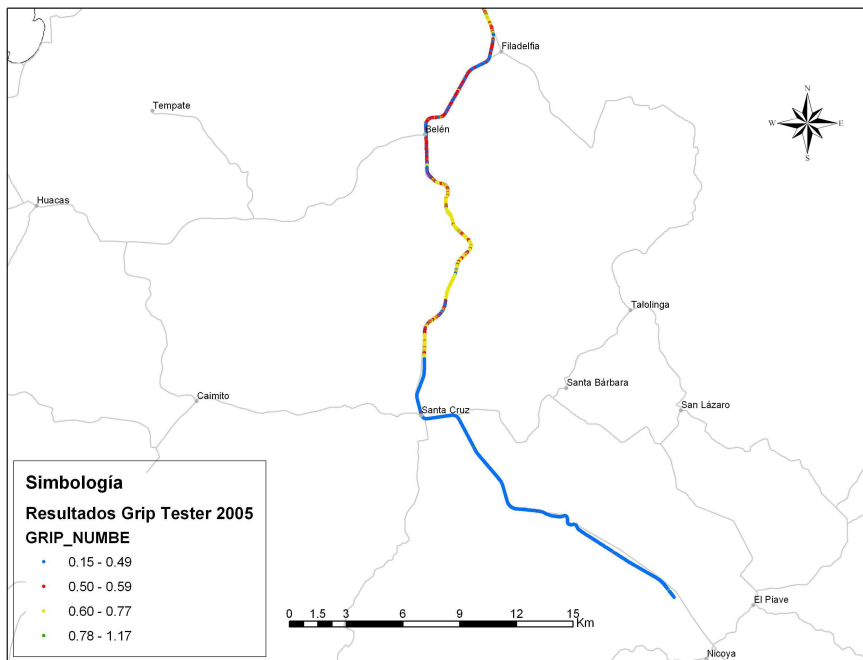


Figura C. Tramo de ruta 21 (Filadelfia – Nicoya)

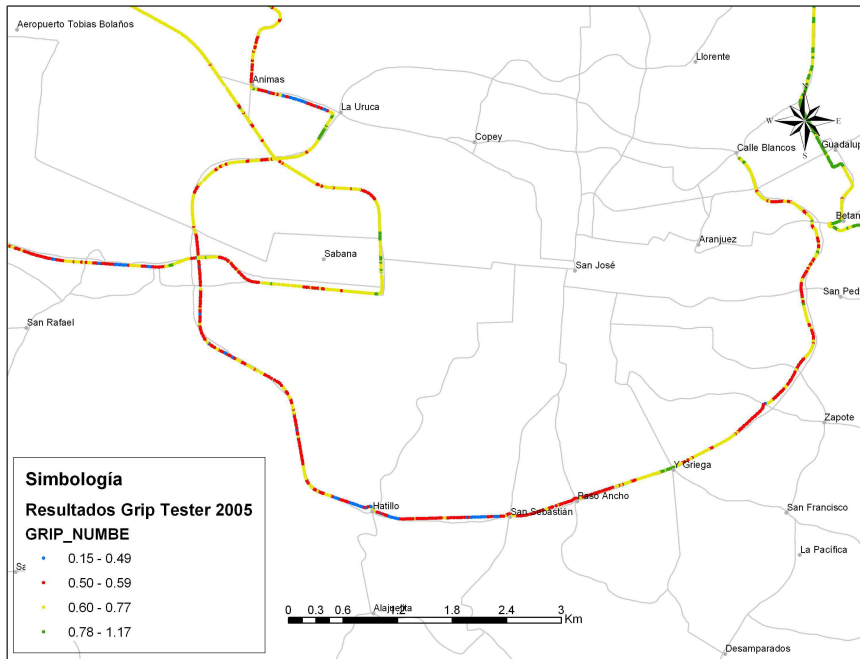


Figura D. Tramo de ruta 39 (Circunvalación)

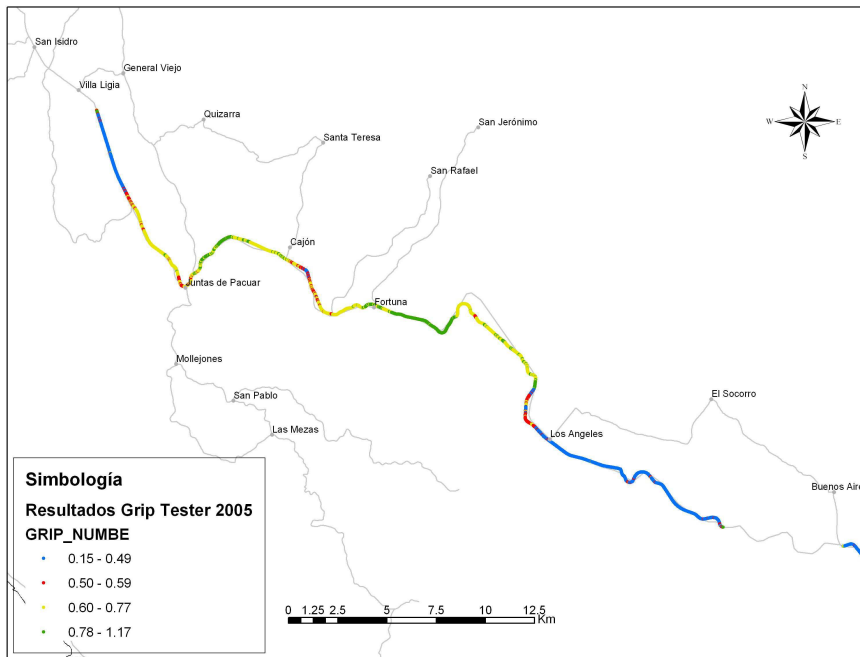


Figura E. Tramo de ruta 2 (San Isidro – Buenos Aires)

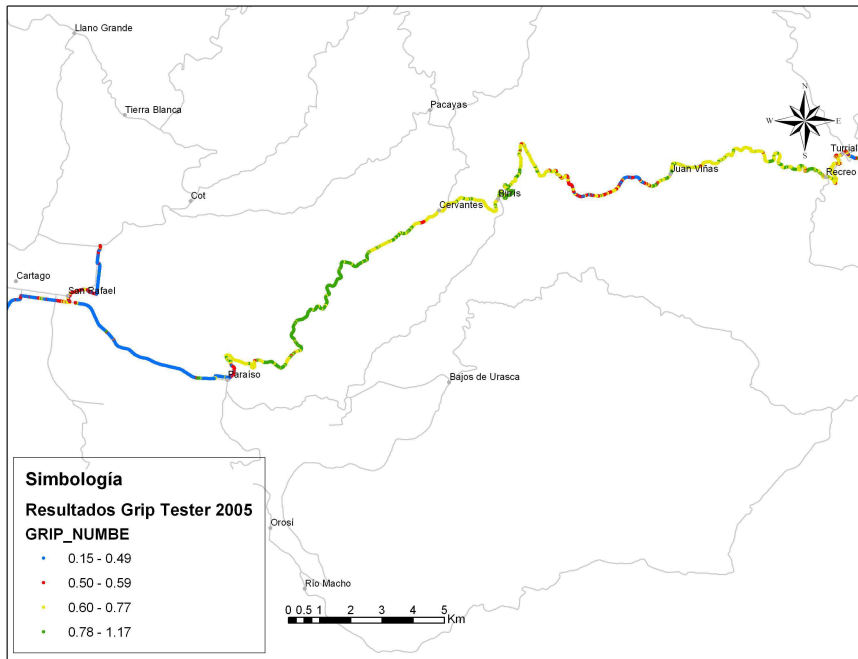


Figura F. Tramo de ruta 2 y 10 (Cartago - Turrialba)