

CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL EN CARRETERAS DE MÉXICO

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Instituto Mexicano del Transporte

**Diana Berenice López Valdés
Paul Garnica Anguas
Publicación Técnica No.170
Sanfandila, Qro. 2002**

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**CONSIDERACIONES PARA LA
APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN
INTERNACIONAL EN CARRETERAS DE
MÉXICO**

Diana Berenice López Valdés
Paul Garnica Anguas

**Publicación Técnica No. 170
Sanfandila, Qro, 2001**

CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Mixcoac - Benito Juárez
03730 México, D.F.
Tels. (5) 598 38 63
598 52 18
Fax (5) 598 64 57
Internet:
<http://www.imt.mx>

SANFANDILA

Km 12+000, Carretera
Querétaro – Galindo
76700 P. Escobedo, Qro.
Tels. (4) 216 97 77
216 97 44
216 95 97
Fax (4) 216 96 71

Este trabajo fue realizado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Diana Berenice López Valdés y Paul Garnica Anguas. Se agradecen los valiosos comentarios de Rodolfo Téllez Gutiérrez.

Resumen.

En este trabajo se describe brevemente el experimento que el comité técnico de Caracterización Superficial de la Asociación Permanente de Congresos en Carreteras llevo a cabo para comparar y armonizar mediciones de textura y resistencia al deslizamiento; que dio como producto final un estándar de comparación internacional denominado Índice de Fricción Internacional IFI.

Se presenta el procedimiento de determinación del IFI a partir de mediciones con el péndulo de fricción y el método del Círculo de Arena en tramos carreteros con diversas condiciones superficiales.

Finalmente, se discute su interpretación e implementación con miras a su aplicación para evaluar periódicamente las condiciones de seguridad en carreteras.

Abstract.

This study describes briefly the experiment made by the Permanent Association of Road Congress Technical Committee on Surface Characterization which decided to undertake an international experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurement.

Also, they are presented procedures that permit the method to be understandable.

It is presented the procedure to determinate the IFI using the British Tester and the sand cone in road sections with several surface conditions.

Finally, discussions are made about its interpretation and use its implementation on the periodical evaluation of the safety condition on the Highways and another roads.

Resumen Ejecutivo

Las cualidades de la fricción en el pavimento juegan un papel importante dentro de la seguridad en carreteras. La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático - pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos. Los métodos y sistemas usados a través del mundo para medición de textura y resistencia al deslizamiento varían significativamente; es por esta razón que el comité técnico de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (PIARC) en Caracterización Superficial, en 1992, decidió emprender un experimento internacional para comparar y armonizar mediciones de textura y resistencia al deslizamiento. Como resumen de las observaciones experimentales realizadas en el experimento se puede establecer lo siguiente:

“Al aumentar la velocidad, disminuye la fricción. Esta disminución es tanto menor cuanto mejor es la capacidad de evacuación del agua que proporciona la macrotextura”

En este trabajo se presenta una descripción de la obtención del Índice de Fricción Internacional a partir de mediciones de textura y resistencia al deslizamiento, y finalmente, su interpretación y aplicación para evaluar las condiciones superficiales del pavimento, en aras de la seguridad en carreteras.

Se evaluaron la capacidad de resistencia al deslizamiento de dos formas distintas:

1. Midiendo directamente el coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento mojado,
2. Analizando la macrotextura o la capacidad de drenaje superficial del pavimento (para estimar la reducción de la adherencia que se produce al aumentar la velocidad).

Se muestran los criterios para la selección de los tramos de prueba. Además se describe detalladamente los procedimientos de prueba utilizados en esta investigación. Para la medición de la textura se utilizó la prueba del círculo de arena. Este método de prueba es adecuado para pruebas de campo; determina el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento. Para la medición de la fricción se utilizó el Péndulo Inglés, que tiene por objeto obtener un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.D.R), manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, se obtienen valores de las características antideslizantes de la superficie de un pavimento.

Es presentado, paso a paso, un ejemplo para calcular los valores del IFI. Mostrando tablas de datos de campo y posteriormente el procesamiento de dichos datos. Aunado a la secuencia de las expresiones, hasta llegar a la obtención del valor de IFI característico del tramo.

Resumen Ejecutivo

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, el cual es mostrado en este documento.

En conclusión, la principal ventaja es la propuesta de una escala común de valores de fricción denominado **IFI** en la que se engloben todos los resultados de medidas de fricción en pavimentos de carreteras y aeropuertos con una precisión aceptable. Las administraciones de carreteras y aeropuertos podrán adoptar una escala universal sin tener que cambiar sus métodos actuales, su experiencia o sus datos históricos. Se podrán comparar los umbrales de intervención. Los usuarios de aeropuertos y carreteras podrán recibir informes sobre las condiciones de fricción en una escala idéntica en cualquier región o país, así como tipo de pavimento (flexible o Rígido), lo que contribuirá a la mejora de la *seguridad*. Además de las diversas causas por la que se originan los accidentes, existe el riesgo potencial del *Hidroplaneo*, que se encuentra fundamentalmente asociado con la *macrotextura*. La aplicación del modelo PIARC requiere de una mayor experiencia para adquirir la sensibilidad necesaria, a partir del par ordenado, para determinar la condición actual de la carretera.

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCION..... | 1 |
| 2. EXPERIMENTO DE ARMONIZACIÓN “PIARC”..... | 2 |
| 3. DESCRIPCION DEL MODELO DE REFERENCIA | 8 |
| 3.1 MODELO DE PENNSILVANIA..... | 8 |
| 3.2 MODELO PIARC | 9 |
| 4. ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL, IFI | 12 |
| 4.1 DEFINICIÓN DEL IFI..... | 12 |
| 4.2 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO Sp..... | 12 |
| 4.3 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO F60 | 13 |
| 4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL IFI | 15 |
| 5. MEDICIONES EN CARRETERAS NACIONALES..... | 16 |
| 5.1 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO..... | 16 |
| 5.2 MEDICIÓN DE LA TEXTURA POR MEDIO DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA | 17 |
| 5.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA..... | 17 |
| 5.2.2 PROCEDIMIENTO | 18 |
| 5.2.3 EQUIPO..... | 19 |
| 5.2.4 CÁLCULO..... | 20 |
| 5.3 MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN POR MEDIO DEL PÉNDULO INGLÉS | 20 |
| 5.3.1 DESCRIPCIÓN..... | 20 |
| 5.3.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE | 21 |
| 5.3.3 EQUIPO..... | 22 |
| 5.3.4 CALCULO..... | 22 |
| 5.3.5 RANGOS DE FRICCIÓN..... | 23 |
| 6. APLICACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL IFI | 24 |
| 6.1 RELACIÓN ENTRE FRICCIÓN (F) Y DESLIZAMIENTO(S)..... | 24 |
| 6.2 EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL IFI | 25 |
| 7. GRAFICAS DE ACEPTACION O RECHAZO | 38 |
| 8.1. GENERALES..... | 48 |
| 8.2. LIMITANTES DEL MODELO | 48 |
| 8.3. CUESTIONES PENDIENTES..... | 48 |
| 8.4. PERSPECTIVAS | 49 |
| REFERENCIAS | 50 |
| ANEXO A..... | 51 |
| ANEXO B..... | 53 |
| ANEXO C..... | 58 |
| ANEXO D..... | 59 |

1. INTRODUCCION

Una de las manifestaciones más evidentes de la evolución y del grado de desarrollo de un país depende, principalmente, de una buena y segura infraestructura vial; capaz de soportar las necesidades de movimiento del tránsito vehicular que se demanden en la actualidad y en un futuro.

Los accidentes que ocurren en el sistema carretero de México son un factor que afecta drásticamente la calidad y eficiencia del servicio en las carreteras, reflejado en los tiempos y costos de operación. Esta situación se agrava más conforme aumenta el volumen vehicular. Por lo anterior, existe un gran interés en los factores que contribuyen a generar accidentes viales y en la forma de poder evaluar, simular y definir ciertos parámetros que garanticen la seguridad en las carreteras.

Las cualidades de fricción en el pavimento juegan un papel importante dentro de la seguridad en carretera. La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático - pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos. Los métodos y sistemas usados a través del mundo para medición de textura y resistencia al deslizamiento varían significativamente; es por esta razón que el comité técnico de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (PIARC) en Caracterización Superficial, decidió emprender un experimento internacional para comparar y armonizar mediciones de textura y resistencia al deslizamiento.

El objetivo general del experimento fue el de comparar la gran diversidad de métodos de evaluación usados alrededor del mundo y desarrollar un método capaz de convertir los resultados producidos por diferentes equipos a una escala común, llamada Índice de Fricción Internacional (IFI), de esta manera proveer una base para la estandarización y armonización internacional. Cada país podrá ser capaz de continuar usando sus métodos tradicionales de medición mientras permanece siendo posible la relación con el índice internacional. Además, los procedimientos fueron creados de tal manera que permitieran al método extenderse a equipos que no participaron en el experimento.

En este trabajo se presenta una descripción del experimento internacional antes mencionado, el procedimiento de obtención del IFI a partir de mediciones de textura y resistencia al deslizamiento y, finalmente, su interpretación y utilización en vistas de su aplicación para evaluar periódicamente las condiciones de seguridad en carreteras.

2. EXPERIMENTO DE ARMONIZACIÓN “PIARC”

Con la finalidad de armonizar los numerosos equipos y métodos que se utilizan para evaluar la resistencia al deslizamiento y la textura, en diferentes países, el Comité de Características Superficiales de PIARC propuso un experimento efectuado en carreteras de Bélgica y España, en 1992. Los tramos seleccionados representaron una gran variedad de pavimentos tanto asfálticos como de concreto hidráulico, cubriendo una gama de valores y parámetros de microtextura, macrotextura, megatextura, pulido y desgaste.

Los principales objetivos del experimento fueron los siguientes:

- Desarrollar y valorar las relaciones entre las medidas de fricción y textura tomadas con distintos equipos, variando las condiciones físicas de ensayo: textura, velocidad, ángulo de esviaje, neumático de ensayo, clima, materiales, etc.
- Cuantificar la relación entre las medidas de la fricción y la textura tomadas con equipos distintos en condiciones específicas, para facilitar el intercambio y la armonización de la información técnica.
- Determinar la frecuencia y los errores de medida propios de los equipos, evaluar el número de muestras y la frecuencia de muestreo que requieren los distintos métodos para alcanzar una consistencia adecuada.
- Facilitar el intercambio de información técnica.
- Establecer una escala internacional de fricción a la que puedan referirse todos los equipos y evaluar su aptitud para determinar valores en esta escala.

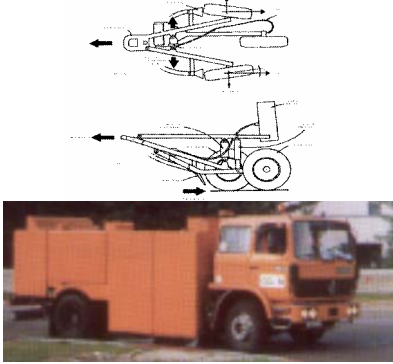


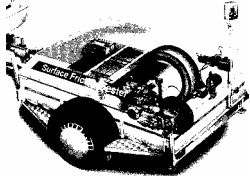
Con base en estos objetivos y conociendo el mecanismo de la adherencia, entre el neumático y el pavimento, evaluaron la capacidad de resistencia al deslizamiento de dos formas distintas:

1. Midiendo directamente el coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento mojado,
2. Analizando la macrotextura o la capacidad de drenaje superficial del pavimento (para estimar la reducción de la adherencia que se produce al aumentar la velocidad).




El coeficiente de fricción depende del número de puntos de contacto entre el neumático y los pétreos del pavimento; es por ello que la calidad del pétreo juega un papel importante debido a que entre más áspero y anguloso sea mayor fricción existirá. La capacidad drenante en la superficie (macrotextura) juega, a su vez, un papel importante al permitir con mayor rapidez la salida del agua de lluvia y reducir entonces los riesgos de hidroneo.

Para efecto del Experimento Internacional de Comparación y Armonización, los equipos utilizados (ver tabla 6 o en tabla 1 del anexo A) para evaluar los 54 tramos de prueba, fueron clasificados de acuerdo a lo que se indica en la Tabla 1.

Todos los equipos participantes 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; para la medición de la macrotextura los equipos no estacionarios usan diferentes tecnologías basadas en rayos láser.

| <i>Para Fricción</i> | <i>Descripción</i> | <i>Ejemplos:</i> |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Con ruedas oblicuas, en inglés se usa el término <i>Side Force</i>. | <p>La rueda se mantiene formando un ángulo respecto al sentido del movimiento, sin aplicar ninguna otra condición de frenado. Se mide el esfuerzo lateral, perpendicular al plano de rotación.</p> |  <p>Nombres comerciales : <i>Mu-Meter / SCRIM</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> Con una rueda parcialmente bloqueada, en inglés se usa el término <i>Fixed Slip</i> | <p>Deslizamiento fijo. La rueda gira parcialmente bloqueada en la dirección de la trayectoria del vehículo.</p> |  <p>Nombre comercial : <i>Griptester</i></p>  <p>Nombre comercial : <i>Norsemeter</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> Con una rueda bloqueada, en inglés se usa el término <i>Locked Wheel</i> | <p>La velocidad relativa entre el neumático y el pavimento es igual a la del vehículo. El bloqueo es del 100% y mide la fricción máxima.</p> |  <p>Nombre comercial : <i>Surface Friction Tester</i></p> |

(a)

| <i>Para Textura</i> | <i>Descripción</i> | <i>Ejemplos:</i> |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Equipos Estacionarios | Con velocidad de deslizamiento nula |  <p>Nombre comercial: Círculo de arena ASTM E-965</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> Equipos Móviles a velocidad de crucero | Con velocidad de deslizamiento desde 10 kph y hasta 60 kph |  <p>Nombre comercial: AEPO RST</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> Equipos Móviles de gran velocidad | Con velocidad arriba de los 60 kph |  <p>Nombre comercial: Selcom Road Laser</p> |

(b)

Tabla 1. Clasificación de los equipos según la medición de fricción (a) y textura (b).

Todas las mediciones de *textura* fueron realizadas sobre superficies secas antes de ser mojado el pavimento para las pruebas de fricción. Los equipos de *fricción* fueron ensayados a velocidades de 30, 60 y 90 km/h; y en cada prueba se realizaron dos repeticiones para cada velocidad.

Todos los resultados de las medidas se han reunido en una base de datos en la que se han reportado los datos del equipo, las características de los tramos, la hora, fecha y datos climáticos, las características de la medida, medidas de textura y de fricción. La base de datos definitiva está disponible en la Secretaría de PIARC.

Se realizó un primer análisis estadístico en el que se estableció la validez de los datos almacenados en la base de datos. Se realizaron también estudios de repetibilidad de los equipos de medida de la fricción. Los estudios se realizaron

para cada una de las tres velocidades empleadas y para diversos niveles de fricción. Se ha observado que no existe un comportamiento generalizado con respecto al efecto de la velocidad; algunos se comportan mejor a velocidades altas y otros a velocidades bajas, y muchos equipos no muestran tendencias claras respecto a la velocidad. Los estudios de repetibilidad en función del nivel de fricción tampoco presentaron tendencias claras pero presentaron resultados razonables.

Se compararon los resultados de todos los equipos de fricción entre sí, independientemente del tipo de equipo, de neumático y del principio de medida. En general las correlaciones han sido aceptables. También se estudiaron las correlaciones medias entre equipos de un mismo tipo. Los valores medios del coeficiente de correlación son los que se muestran en la Tabla 2.

| TIPO DE EQUIPO | <i>Rueda oblicua</i> | <i>Rueda parcialmente bloqueada</i> | <i>Rueda bloqueada</i> | <i>Péndulo de fricción</i> |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| <i>Rueda oblicua</i> | 0.863 | 0.819 | 0.795 | 0.665 |
| <i>Rueda parcialmente bloqueada</i> | 0.819 | 0.834 | 0.783 | 0.732 |
| <i>Rueda bloqueada</i> | 0.795 | 0.783 | 0.843 | 0.670 |
| <i>Péndulo de fricción</i> | 0.665 | 0.732 | 0.670 | 0.830 |

Tabla 2. Coeficientes de correlación resultantes de la comparación entre los diferentes tipo de equipos para medición de fricción.

La correlación se basa en un ajuste lineal, de tal manera que valores alrededor de 0.7 se consideran bajos; esto es indicativo de una relación no lineal entre los equipos o bien un efecto de ruido en las mediciones que indica que se necesita una variable adicional, como por ejemplo la macrotextura, para mejorar la correlación. En particular se observa que las correlaciones con los ensayos de péndulo (que dan una idea de la microtextura) han sido muy bajos.

En cuanto a la textura, los análisis se han centrado en la macrotextura. La medida de referencia ha sido el ensaye del Círculo de Arena (ASTM E965) que proporciona un valor medio de la textura MTD (por sus siglas en inglés Mean Texture Depth). Los equipos que han medido la textura basándose en medidas perfilométricas, han presentado distintos indicadores de ésta; los más comunes son la raíz media cuadrática del perfil en milímetros RMS (por sus siglas en inglés Root Mean Square) ó una profundidad promedio calculada del perfil MPD (por sus siglas en inglés Mean Profile Depth, ASTM E1845). Se encontraron en general buenas correlaciones entre los distintos equipos como se puede apreciar en la Tabla 3.

| Parámetro de textura | Coefficiente de correlación |
|-----------------------------|------------------------------------|
| MPD, ASTM E1845 | Entre 0.906 y 0.950 |
| RMS | Entre 0.793 y 0.939 |
| MTD, ASTM E965 | 0.929 |

Tabla 3. Coeficientes de correlación obtenidos para los diferentes parámetros de textura

Como resumen de las observaciones experimentales realizadas en el experimento se puede establecer lo siguiente:

“Al aumentar la velocidad, disminuye la fricción. Esta disminución es tanto menor cuanto mejor es la capacidad de evacuación del agua que proporciona la macrotextura”

El hecho de que no existan valores exactos conocidos de la fricción de un pavimento ha obligado a establecer unos valores de referencia arbitrarios (denominados en inglés *Golden Values*) de la fricción en cada uno de los tramos medidos. El establecimiento de esos valores de referencia se realizó a partir de las mediciones de todos los equipos participantes en el experimento a través de un modelo teórico, denominado *Modelo PIARC*, que se describe en el capítulo siguiente y que será la base del establecimiento del Índice de Fricción Internacional *IFI*.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE REFERENCIA

La obtención del Índice de Fricción Internacional (IFI) se basa en el modelo PIARC y este a su vez en el modelo de Pennsylvania, por lo que a continuación se hace una breve explicación de estos modelos.

3.1 MODELO DE PENNSILVANIA

El modelo de Pennsylvania (Henry. 1992) asocia la fricción $F(S)$ en una prueba de deslizamiento con la correspondiente velocidad de medición (S) en una forma definida por la ecuación siguiente:

$$F(S) = F_0 \cdot \ell^{\frac{-S}{S_0}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$F(S)$ = Es la fricción medida con un cierto equipo.

S = Es la velocidad de deslizamiento de la llanta de prueba.

S_0 = Es La velocidad del vehículo afectada por la condición de la llanta de prueba.

F_0 = Es el valor de la fricción a una velocidad de deslizamiento cero, o sea que el equipo se considera estático o estacionario.

El modelo traduce matemáticamente el hecho experimental de que a mayor velocidad menor valor de la fricción. Este modelo se modificó de manera que la velocidad de referencia fuera 10 km/h en lugar de 0 km/h; esto se debió a que el modelo no se adaptaba lo suficiente a las mediciones experimentales y presentaba mucha dispersión en los resultados. Por tanto, el modelo modificado adopta la siguiente forma:

$$F(S) = F_1 \cdot \ell^{\frac{10-S}{S_1}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

F_1 = Es el valor de la fricción obtenida para una velocidad de deslizamiento a 10 km/h

S_1 = Es la velocidad del vehículo afectada por la condición de la llanta de prueba.

En la figura 1 se gráfica la ecuación anterior que muestra la relación típica entre fricción y velocidad de deslizamiento. La fricción varía prácticamente entre un rango de 0 a 1; siendo 0 el valor correspondiente a la condición mas lisa y 1 a la más rugosa.

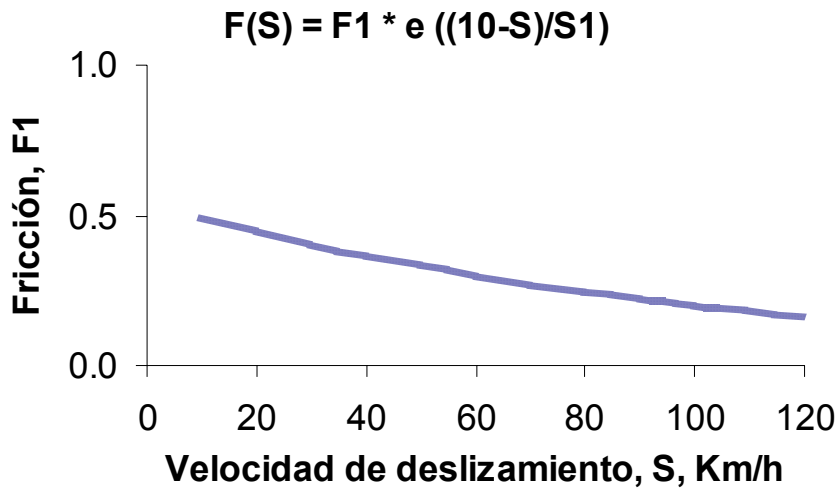


Figura 1. Curva de comportamiento del Modelo de Pensilvania de acuerdo a la ecuación 2

3.2 MODELO PIARC

El modelo PIARC es simplemente una modificación del de Pensilvania para el caso en que la velocidad de referencia es de 60 km/h. El modelo se describe entonces en función de una constante "FR60" que corresponde al valor de la fricción medida para esa velocidad de deslizamiento y su ecuación queda de la siguiente manera:

$$FRS = FR_{60} * e^{\frac{60-S}{Sp}} \quad (\text{Ec. 3})$$

La figura 2 representa de forma genérica el modelo PIARC para un equipo determinado y se pueden apreciar los rangos de velocidad cubiertos por los equipos participantes en el experimento. Para un pavimento dado, se pueden establecer los parámetros FR60 y Sp a partir de las mediciones de fricción FR con cierto equipo para dos velocidades diferentes.

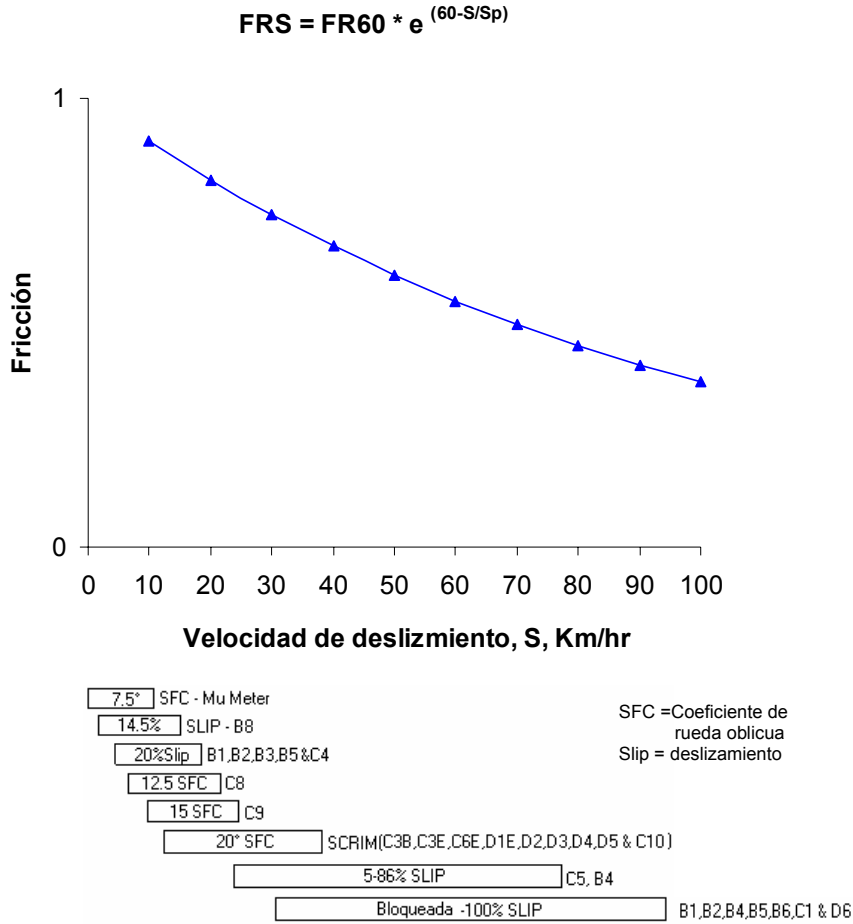


Figura 2. Curva de Fricción – Velocidad de deslizamiento del Modelo PIARC además de los rangos para varios de los equipos que participaron en el experimento

La idea es que las curvas obtenidas con el modelo PIARC por diferentes equipos estarán, si el proceso de armonización ha sido eficaz, muy próximas unas de otras y muy próximas también de la *curva de referencia* (arbitraria y denominada en inglés *Golden Values*) cuya expresión es (con analogía a la ecuación 3.3):

donde:

$$GFS = GF_{60} * e^{\frac{60-S}{GS}} \quad (\text{Ec. 4})$$

GFS = Es la fricción en la curva de referencia.

GF60 = Es el valor de la fricción en la curva de referencia correspondiente a una velocidad de deslizamiento de 60 km/h.

GS = Es la constante que representa la influencia de la velocidad en la curva de referencia.

Los valores de las constantes GF60 y GS se obtuvieron por un promedio de los valores FR60 y Sp obtenidos en todos los tramos experimentales con todos los equipos de medición utilizando neumáticos lisos. La razón de preferir los neumáticos lisos se funda en su mayor sensibilidad a la macrotextura del pavimento.

Determinados los valores de los parámetros de la curva de referencia se pudo entonces proceder a la obtención de correlaciones de estos parámetros con los correspondientes a cada uno de los equipos de medición que participaron en el experimento.

El proceso de armonización permitió establecer para cada equipo la mejor estimación posible para los parámetros GF60 y GS de la curva de referencia.

De acuerdo a lo establecido en el experimento internacional de PIARC, al valor de la mejor estimación para el caso de la fricción se le denominará F60 y para el parámetro de velocidad la mejor estimación es directamente Sp.

Con estos antecedentes, en el capítulo siguiente se define el concepto del Índice de Fricción Internacional y la forma de su obtención en la práctica.

4. ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL, IFI

4.1 DEFINICIÓN DEL IFI

El modelo PIARC descrito es la base de la definición del Índice de Fricción Internacional, IFI, a través de los parámetros F60 y Sp. Así entonces, el IFI de un pavimento se expresa por el par de valores (F60,Sp) expresados entre paréntesis y separados por una coma; el primer valor representa la fricción y el segundo la macrotextura.

El primero es un número adimensional y el segundo es un número positivo sin límites determinados y con 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 el segundo número que compone el IFI.

4.2 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO Sp

Durante la elaboración del modelo, y a partir de los datos del experimento PIARC, se ha comprobado que la constante de velocidad **Sp** puede ser determinada mediante una regresión lineal en función de la medida en campo de la *macrotextura* (Tx) tal que:

$$Sp = a + (b \cdot Tx) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde los valores de las constantes a y b para cada uno de los equipos que participaron en el experimento se presentan en la Tabla 4.

| Prueba | a | b |
|---------------------|-------|-------|
| MPD por ASTM E 1845 | 14.2 | 89.7 |
| MTD por ASTM E 965 | -11.6 | 113.6 |

Tabla 4. Valores de a y b para la estimación de la constante de velocidad

4.3 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO F60

Para la estimación de F60 se establece el tipo de equipo a emplear y se realiza la medición de la fricción FRS en una sección de un pavimento dado. Se determina la velocidad S que depende del tipo de la rueda de medición y de la velocidad V del vehículo de arrastre de acuerdo a lo que se indica en la Tabla 5.

| Tipo de Equipo | Ecuación para determinar S |
|----------------------------------|--|
| Con rueda bloqueada | $S = V$ |
| Con rueda parcialmente bloqueada | S = V por el % de deslizamiento |
| Con rueda oblicua | S = V por el $\text{Sen } \alpha$, donde α = ángulo de esviaje |

Tabla 5. Ecuaciones para determinar S según el tipo de equipo.

Se determina el valor de la constante FR60 usando el valor de la fricción FRS obtenida en campo con algún equipo a la velocidad de deslizamiento S a partir de la ecuación 3, de donde despejando FR60 se obtiene:

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Finalmente se obtiene el valor buscado de F60 a través de la siguiente correlación con FR60 establecida por el experimento PIARC:

$$F60 = A + (B \cdot FR60) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde A y B son constantes según el equipo utilizado para medir la Fricción y sus valores se muestran en la Tabla 6.

| Llantas lisas | | Clave | S | A | B | C |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Características | Equipo | | Km/hr | Cte. | Cte. | Cte. |
| Rueda bloqueada | ASTM E 274 (USA) | B6 | 65 | 0.045 | 0.925 | 0 |
| | LCPC Skid Trailer (F) | D6 | 60 | 0.002 | 1.008 | 0 |
| Rueda parcialmente bloqueada | OSCAR a 86% (N) ^E | B4E | 52 | -0.03 | 0.864 | 0 |
| | OSCAR a 20% (N) ^E | B4E | 12 | 0.119 | 0.643 | 0 |
| | Komatsu skid Trailer (J) | C5 | 10 | 0.042 | 0.849 | 0 |
| | DWW Trailer (NL) | C6E | 43 | 0.019 | 0.868 | 0 |
| | Griptester (UK) | D8 | 9.4 | 0.082 | 0.910 | 0 |
| Rueda Oblicua | Stradograph (DK) | C9 | 12.5 | 0.054 | 0.770 | 0 |
| | Odoliograph Wallon (B) | C10 | 12.9 | 0.113 | 0.729 | 0 |
| | Odoliograph CRR (B) | D1E | 20.5 | 0.113 | 0.746 | 0 |
| | SCRIM Flemish (B) | C3B | 20.5 | 0.049 | 0.967 | 0 |
| | SCRIM CEDEX (E) | C4 | 20.5 | 0.019 | 0.813 | 0 |
| | SCRIM MOPT (E) | C8 | 20.5 | 0.032 | 0.873 | 0 |
| | SCRIM SRM (D) | D2 | 20.5 | 0.017 | 0.850 | 0 |
| | SCRIM GEOCISA (E) | D3 | 20.5 | 0.021 | 0.928 | 0 |
| | SCRIM (F) | D4 | 20.5 | -0.006 | 0.862 | 0 |
| | SUMMS (I) | | 20.5 | 0.002 | 0.987 | 0 |
| SCRIMTEX (UK) | D5 | 17.1 | 0.033 | 0.872 | 0 | |
| Equipos con neumáticos gravados | | | | | | |
| Rueda bloqueada | Stuttgarter Reibungsmesser (CH) | B1 | 60 | 0.022 | 0.050 | 0.082 |
| | Skiddometer (CH) | B2 | 60 | 0.026 | 0.504 | 0.099 |
| | Stuttgarter Reibungsmesser (A) | B5 | 60 | -0.072 | 0.767 | 0.086 |
| | ASTM E 274 (USA) | B6 | 65 | -0.023 | 0.607 | 0.098 |
| | Equipo de Fricción (PL) | C1 | 60 | -0.025 | 0.807 | 0.068 |
| Rueda parcialmente bloqueada | Stuttgarter Reibungsmesser (CH) | B1 | 12 | 0.141 | 0.323 | 0.074 |
| | Skiddometer | B2 | 12 | 0.03 | 0.918 | -0.014 |
| | BV – 11 (S) | B3 | 12 | 0.04 | 0.856 | -0.016 |
| | Stuttgarter Reibungsmesser (A) | B5 | 12 | 0.02 | 0.867 | -0.006 |
| Equipos con zapata | | | | | | |
| Estáticos | DF Tester at 60 Km/h (J) | A13 | 60 | -0.034 | 0.771 | 0 |
| | DF Tester at 20 km/h (J) | A13 | 20 | 0.081 | 0.723 | 0 |
| | Péndulo de fricción BPT (USA) | A14 | 10 | 0.056 | 0.008 | 0 |
| | Péndulo de fricción SRT (CH) | B7 | 10 | 0.044 | 0.01 | 0 |

Tabla 6. Lista de equipo que fueron calibrados para predecir el F60

4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL IFI

Determinados los parámetros mencionados anteriormente se dice entonces que el tramo de pavimento en estudio tiene un valor del Índice de Fricción Internacional que se expresa como IFI(F60,Sp). El conocimiento de esos parámetros permite además conocer la curva de referencia estimada de fricción en función de la velocidad de deslizamiento (fig. 7) con una ecuación análoga a la 3 que se expresa como:

$$FRS = F60 * e^{\frac{60-s}{Sp}} \quad (\text{Ec. 8})$$

En el capítulo siguiente se presentan, a manera de ejemplo, algunas mediciones de IFI realizadas en carreteras representativas de la red nacional.

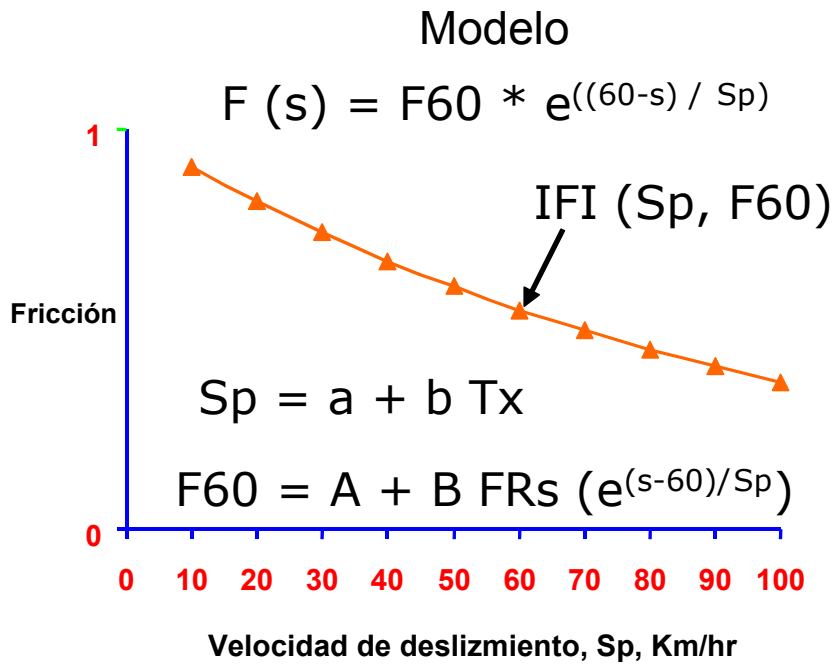


Figura 7. Modelo del Índice de Fricción Internacional, según documento PIARC

5. MEDICIONES EN CARRETERAS NACIONALES

Los tramos evaluados en Querétaro fueron de una longitud de 500 metros y se evaluaron puntos a cada 50 m. Estos tramos fueron seleccionados debido a que se cuenta con un historial y monitoreo de los mismos. Mientras que en los tramos de Monterrey se seleccionaron tomando en cuenta los puntos negros (zonas con alto índice de accidentes) y solo se tomo una longitud de 100 m, debido al alto volumen de tránsito y peligrosidad en condiciones húmedas.

5.1 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- 1 Los tramos en estudio se consideraron de 100 a 500 m de longitud
- 2 Cada tramo se dividió en segmentos de 50 m
- 3 Cada segmento se dividió en tres secciones transversales (perfil externo, central e interior del carril) tratando, en lo posible, de tomar las lecturas en las roderas y la parte central del carril.
- 4 Los tramos de ensayo se señalizaron convenientemente para poder realizar las mediciones. (fig. 8)
- 5 Se formaron tres brigadas, una para las pruebas de textura (círculo de arena), otra para las pruebas de fricción (péndulo británico) y la tercera para seguridad (bandereros).
- 6 Las medidas de la textura se llevaron a cabo antes de realizar las mediciones de fricción, es decir antes de mojar el pavimento.



★ Bandereros
← Sentido del tránsito

Figura 8. Desvío del tránsito en una carretera

5.2 MEDICIÓN DE LA TEXTURA POR MEDIO DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA

5.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA

Este método de prueba (fig. 9) es adecuado para pruebas de campo el cual determina el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento. El conocimiento del espesor de la macrotextura sirve como una herramienta en la caracterización de las texturas superficiales de los pavimentos. Cuando se utiliza en conjunción con otras pruebas físicas, el espesor de la macrotextura derivada de este método de prueba puede ser utilizado para determinar la capacidad de resistencia al deslizamiento de los materiales en pavimentos o la sugerencia de un mejor acabado. Cuando se utiliza con otras pruebas, se debe tener cuidado de que todas ellas se apliquen al mismo lugar. Se pueden obtener mejoras en la evaluación del acabado de pavimentos y planes de mantenimiento del uso de este método.

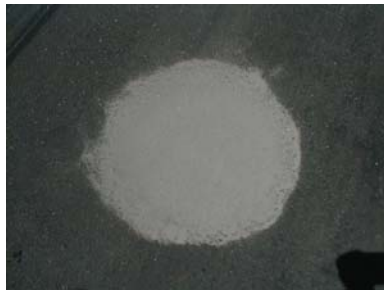


Figura 9. Círculo de arena (ASTM E 965)

Las mediciones del espesor de la textura producidos utilizando este método de prueba se ve influenciada por las características de la macrotextura de la superficie. La forma de la partícula del agregado, tamaño y distribución son características de la textura superficial no tomada en cuenta en este procedimiento. Este método de prueba no intenta proporcionar una calificación completa de las características de la textura superficial.

Los valores del espesor de la macrotextura superficial en el pavimento determinados por este método, con el material y procedimientos establecidos aquí, no necesariamente concuerda o se correlaciona directamente con otras técnicas de medición de textura superficial. Este método también es adecuado para propósitos de investigación y desarrollo, en donde se realizan comparaciones entre superficies de pavimento en la misma evaluación.

La superficie del pavimento a ser muestreado utilizando este método de prueba debe estar seca y libre de cualquier residuo de construcción, escombros superficiales, y partículas agregados sueltos que se pudieran remover o desplazar durante condiciones ambientales y de servicio normales.

5.2.2 PROCEDIMIENTO

Los materiales y método de prueba estándar constan de una cantidad de material uniforme, un recipiente de volumen conocido, una pantalla adecuada para protección contra el viento, brochas para limpiar la superficie, un disco plano para dispersar al material sobre la superficie y una regla o cualquier otro dispositivo para determinar el área cubierta por el material. Se recomienda también una balanza de laboratorio para asegurarse de la consistencia de las mediciones de cada ensaye.

El procedimiento de prueba involucra la dispersión de un volumen conocido de material sobre una superficie de pavimento limpia y seca, la medición de dicha área cubierta, y subsecuentemente se calcula el promedio del espesor entre la parte inferior de los vacíos y la parte superior de los agregados. Esta medición del espesor de la textura superficial refleja las características de la macrotextura.

En la dispersión del material especificado en este método, la superficie de los vacíos está completamente llena hasta los picos de las partículas circundantes. Este método de prueba no se considera conveniente para utilizarse en superficies estriados o pavimentos con vacíos grandes (≥ 1.0 plg (25mm)).

Superficie de prueba. Inspeccione la superficie del pavimento por ser evaluada y seleccione una área seca y homogénea que no contenga características únicas o localizadas tales como grietas y juntas. Debe estar completamente limpia utilizando primeramente la brocha de alambre y posteriormente la brocha de cerdas suaves para remover cualquier residuo, escombros o partículas de agregado sueltas de la superficie. Colocar la pantalla contra viento alrededor de la superficie por ensayar.

Material de prueba. - Llene el volumen de material conocido con material seco, golpee suavemente la base del cilindro varias veces sobre una superficie rígida. Llene con material hasta la parte superior del cilindro y nivele con una regleta. Si se dispone de una balanza, determine la masa del material en el cilindro en el cilindro y utilice esta misma masa de material de prueba en cada determinación.

Medición del ensaye. – Vierta el volumen del material en la superficie limpia dentro del área protegida por la pantalla contra viento. Disperse cuidadosamente al material en el parche circular con la herramienta de disco, con la parte cubierta con hule hacia abajo, llenando los vacíos superficiales hasta los picos de las partículas de agregados, también puede realizarse con una regleta.

Mida y registre el diámetro del área cubierta por el material como mínimo de cuatro localizaciones igualmente espaciadas alrededor de la circunferencia de la muestra. Calcule y registre el diámetro promedio.

Número de mediciones de prueba. – El mismo operador deberá desarrollar al menos cuatro mediciones del espesor de la macrotextura, espaciadas aleatoriamente sobre un tipo de superficie de pavimento ensayado. El promedio aritmético de los valores de espesor de la macrotextura se deben considerar como el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento bajo estudio.

5.2.3 EQUIPO

Material Esferas de vidrio sólido con 90% de redondez de acuerdo con el método de prueba ASTM D 1155 o podría utilizarse arena graduada de tal manera que tengan un mínimo de 90% en peso que pase la malla No. 60 y se retenga en una No. 80.

Recipiente de prueba. Se puede utilizar un recipiente cilíndrico metálico o de vidrio, con volumen interno predeterminado de al menos 1.5 pulgadas cúbicas (25,000 mm³), el cual se utilizará para determinar el volumen de arena dispersa.

Herramienta de dispersión. Se deberá utilizar un disco plano duro de aproximadamente 1 pulgada (25 mm) de espesor y 2.5 a 3 pulgadas (60 a 75 mm) de diámetro para dispersar la arena. La parte inferior del disco deberá estar cubierta con un material de hule duro y se puede acoplar una asa conveniente a la parte superior del disco. O si no se cuenta con esta herramienta, puede ser remplazada por una regleta, lo suficientemente larga para abarcar el diámetro formado por la arena dispersa.

Brochas. Se deberán utilizar una brocha de alambre y una de cerdas suaves se deberán utilizar para limpiar completamente a la superficie del pavimento antes de la aplicación del material de prueba.

Pantalla contra viento. Se utiliza para proteger al material del viento y la turbulencia creada por el tráfico.

Escala. Se deberá utilizar una escala estándar (regla o cinta métrica) de 12 plg. (305 mm) o de longitud mayor que contenga divisiones de 0.1 plg. (2.5mm) o 1 mm (0.04 plg.).

Utilice una balanza de laboratorio, con sensibilidad de 0.1 g, se recomienda con este método de prueba para proporcionar un control adicional y para asegurar que la cantidad de material utilizado para cada medición del espesor de la macrotextura es igual tanto en masa como en volumen.

5.2.4 CÁLCULO

Volumen del cilindro – Calcule el volumen interno del cilindro de prueba como sigue:

$$V = \frac{\pi d^2 H}{4} \quad (\text{Ec. 9})$$

V = volumen interno del cilindro, plg³ (mm³),
d = diámetro del cilindro de prueba, plg (mm), y
H = altura del cilindro, plg (mm)

Espesor promedio de la macrotextura del pavimento.

Calcule el promedio de la macrotextura de la superficie utilizando la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4V}{\pi d^2} \quad (\text{Ec. 10})$$

En donde:

H = promedio del espesor de la macrotextura de la superficie, plg (mm),
V = volumen de la muestra, plg³ (mm³), y
d = diámetro promedio del área cubierta por el material plg, (mm)

5.3 MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN POR MEDIO DEL PÉNDULO INGLÉS

5.3.1 DESCRIPCIÓN

El procedimiento tiene por objeto obtener un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.D.R) que, manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, valore las características antideslizantes de la superficie de un pavimento. Los resultados obtenidos mediante este ensayo no son necesariamente proporcionales o correlativos con medidas de rozamiento hechas con otros equipos o procedimientos.



Figura 10. Péndulo de fricción británico (ASTM E 274)

Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo.

El método de ensaye se puede emplearse también para medidas en pavimentos de edificaciones industriales, ensayos de laboratorio sobre probetas, baldosas o cualquier tipo de muestra de superficies planas terminadas.

5.3.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

- Preparación del aparato

a) Nivelación. Nivelar el instrumento exactamente (con precisión) girando los tornillos niveladores hasta que la burbuja este centrada en el ojo la burbuja niveladora.

b) Ajuste a ceros. Se eleva la cabeza del aparato, de tal forma que el brazo del péndulo oscile sin rozar la superficie a medir y se procede a comprobar el cero de la escala de medida. Para ello se lleva el brazo del péndulo a su posición horizontal hacia la derecha del aparato, quedando enganchado automáticamente en el mecanismo de disparo. Después se desplaza la aguja indicadora hasta el tope situado en la cabeza del aparato, de forma que quede paralela al eje del brazo del péndulo. Este tope, constituido por un tornillo, permite corregir el paralelismo entre la aguja y el brazo. Seguidamente, por presión sobre el pulsador se dispara el brazo del péndulo, que arrastrará la aguja indicadora solamente en su oscilación hacia delante. Se denota la lectura señalada por la aguja de la

escala del panel y se vuelve el brazo a su posición inicial de disparo. La correlación de la lectura del cero se realiza mediante el ajuste de los anillos de fricción. Si la aguja sobre pasa el cero de la escala, la corrección exigirá apretar los anillos de fricción. Si la aguja no alcanza el cero de la escala, la corrección exigirá aflojar los anillos de fricción.

c) Ajuste de la longitud de deslizamiento. Con el péndulo colgando libre colocar el espaciador abajo del tornillo de ajuste o regulación del brazo del péndulo. Bajar el brazo del péndulo de manera que la superficie de la goma apenas toque la superficie. Bloquear la cabeza del péndulo firmemente, levantar el brazo del péndulo, y remover el espaciador. Colocar el calibrador al lado y paralelo a la dirección del balanceo para verificar la longitud de la trayectoria de contacto. Elevar el brazo del péndulo, entonces suavemente bajar hasta la superficie de deslizamiento otra vez se apoye o descansa en la superficie. Si la longitud de la trayectoria de contacto no esta entre 124 y 127 mm (4 7/8 y 5.0 pulgadas) en superficies de prueba planos o entre 75 y 78 mm (2 15/16 y 3 1/16 de pulgada) en superficies curvas del ensaye medidos con la zapata de goma, se puede corregir ajustando la elevación del péndulo o bajar el instrumento con los tornillos niveladores frontales.

5.3.3 EQUIPO

Se utiliza el péndulo británico (fig. 10) o también conocido como Péndulo del TRRL (Transport and Road Research Laboratory), una regleta graduada, termómetro, recipientes para agua, cepillo, cinta métrica.

5.3.4 CALCULO

El coeficiente de resistencia al deslizamiento es obtenido de la siguiente manera:

$$\text{c.d.r} = \frac{\text{LecturaEfectiva}}{100} \quad (\text{Ec. 11})$$

Las medidas efectuadas sobre el pavimento están siempre afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada; es por esto, que al valor obtenido del péndulo se le adiciona un factor (fig.11) a la lectura efectiva. Por ejemplo, si obtenemos una lectura de promedio de 78 y tenemos una temperatura de 30°C, le adicionaremos a 78 el factor de 2 y tendremos 80.

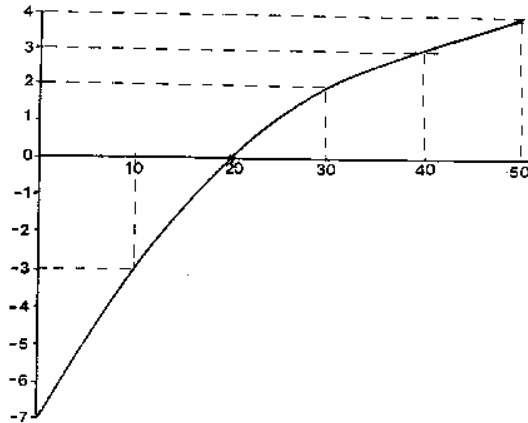


Figura 11. Factor de corrección por temperatura.

Los resultados de las medidas efectuadas en cada zona de ensayo de un tramo de calzada serán expresados por, al menos, tres valores, correspondientes cada uno, a roderas y centro de la calzada. Cada uno de los tres valores o más valores obtenidos será la media aritmética de todas las lecturas efectuadas sobre los puntos de ensayo situados en las superficies consideradas y en todas las secciones transversales de cada tramo.

En pavimentos distintos de calzadas, si no se hubiese hecho distribución de franjas, el resultado de las medidas efectuadas será el valor de la media aritmética de las lecturas efectuadas en cada zona.

5.3.5 RANGOS DE FRICCIÓN

Después de diversas mediciones realizadas en distintos tipos de superficies, nace la siguiente sugerencia, la cual puede estar sujeta a cambios, según se incremente la experiencia. Para valores de fricción con péndulo británico en pavimento mojado (condición crítica) es propuesto lo siguiente:

| Fricción, Valor de CDR, adimensional | Calificación |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| < 0.5 | Malo (derrapamiento del vehículo) |
| 0.51 – 0.6 | De regular a bueno |
| 0.61 – 0.8 | Bueno |
| 0.81 – 0.9 | De bueno a regular |
| > 0.91 | Malo (desgaste de neumáticos) |

Tabla 7. Criterio para evaluar los valores de fricción en la superficie de pavimento

6. APLICACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL IFI

En el diseño y administración de pavimentos para carreteras es fundamental tener un parámetro que mida la fricción en el pavimento, de ahí la importancia de homologar la forma de interpretación de los resultados.

Para el análisis de resultados es necesario realizar mediciones de la textura y la resistencia al deslizamiento (o fricción).

6.1 RELACIÓN ENTRE FRICCIÓN (F) Y DESLIZAMIENTO(S)

Con la ecuación 8 del Modelo para calculo de IFI:

$$FRS = F60 * e^{\frac{60-S}{Sp}}$$

se sustituyen los valores de Sp y F60 representativos para cada tramo y se trazan las curvas de comportamiento de la superficie de pavimento, como muestra la figura 12 a manera de ejemplo:

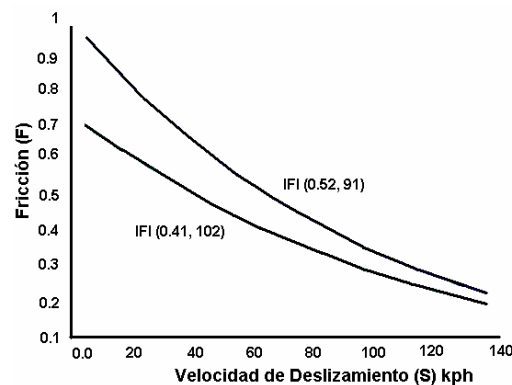


Figura 12. Comparación de dos tramos con IFI (F60, Sp)

En esta gráfica se puede observar que a mayor velocidad la fricción va disminuyendo, esto es debido a la reducción del área de contacto en la interfase pavimento – neumático.

6.2 EJEMPLO DEL CÁLCULO DEL IFI

Para sacar la media de los valores del péndulo, pueden sumarse todos y dividirlo entre el número de lecturas; o bien, eliminar el término más alto y el más bajo, y con las lecturas restantes obtener la media. Esta última operación es más recomendable para evitar que algún valor que se sale de rango afecte significativamente los resultados.

En los valores obtenidos del diámetro del círculo de arena, puede tomarse el mismo criterio. Más si los valores presentan poca dispersión, puede tomarse el promedio de los datos. En la tabla 8 se observan dos grupos de mediciones del círculo de arena, esto fue realizado para ver la dispersión entre dos operadores en un mismo punto. Encontrando que pueden existir diferencias, si los operadores no realizan la prueba con el mismo criterio de dispersión. Por lo que recomendamos que sea una sola persona la que realice este ensaye o se entrene previamente a los operadores a que logren una similitud en resultados, siguiendo adecuadamente los procedimientos indicados en las normas ASTM o NLT.

| | | Péndulo de Fricción | | | | | | | |
|--------|-----------|---------------------|---------|----|----|----|----|-------|-------|
| Caden. | Ubicación | Temp, °C | cdr/100 | | | | | FRs | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Prom. | elim. |
| 0+000 | R. Int. | 25 | 70 | 73 | 74 | 73 | 73 | 72.6 | 73.0 |
| | Centro | 25 | 71 | 76 | 78 | 78 | 79 | 76.4 | 77.3 |
| | R.Ext. | 25 | 61 | 67 | 67 | 70 | 70 | 70.0 | 68.0 |

(a)

| Círculo de arena | | | | | | | | | | |
|------------------|------|----|------|-------|------|------|------|------|-------|---------|
| cm | | | | Prom. | cm | | | | Prom. | Prom.to |
| a | b | c | d | | a | b | c | d | | |
| 44 | 44 | 43 | 43 | 43.5 | 48.5 | 50.5 | 48 | 51 | 49.50 | 46.5 |
| 46 | 46.5 | 46 | 48 | 46.63 | 50.5 | 50 | 48 | 48.5 | 49.25 | 47.9 |
| 33.5 | 34 | 33 | 33.5 | 33.50 | 35.5 | 35 | 36.5 | 36 | 35.75 | 34.6 |

(b)

Tabla 8. Mediciones del Péndulo de fricción (a) y el Círculo de arena (b)

Una vez que se tienen las mediciones de círculo de arena y péndulo de fricción se procede al cálculo del IFI.

Con el valor promedio obtenido de las lecturas de diámetro del círculo y su volumen es calculado el espesor H, como se indicó en el inciso 5.2.4. y con la ecuación 5, el valor de Sp. Por ejemplo, si el valor medido de textura es Tx = 0.42 mm. entonces:

$$Sp = a + bTx$$

$$Sp = -11.59 + 113.63 (0.42)$$

$$Sp = 36.30$$

donde:

Tx = el valor de H en mm.

a y b = corresponde al valor de las constantes para la prueba del círculo de arena

Posteriormente, con los valores de FRS calculamos el valor de FR60, tal como se describe en la ecuación 6; utilizando el promedio de las mediciones con péndulo es FRS = 73 y dado que se considera con este equipo S = 10 km/h, entonces:

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{Sp}}$$

$$FR60 = 73 * e^{((10-60)/36.30)}$$

$$FR60 = 18.4$$

$$F60 = A + B*FR60$$

$$F60 = 0.078 + (0.01071*18.4)$$

$$F60 = 0.275$$

De esta manera se calculan los valores de Sp y F60 como se ilustra en la tabla 9 para un tramo dado.

| Caden. | | Diámetro Prom.tot | Tx H (mm) | Sp | F60 |
|--------|----------|----------------------|--------------|-------|--------|
| 0+000 | R . Int. | 46.50 | 0.4214 | 36.30 | 0.2750 |
| | Centro | 47.94 | 0.3965 | 33.47 | 0.2638 |
| | R.Ext. | 34.63 | 0.7601 | 74.78 | 0.4508 |

(a)

| Valores del por péndulo eliminación FRs | Con S=10 FR60 | Valores de F(S), Km/H | | | | | | |
|--|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| 73.00 | 18.41 | 1.436 | 0.828 | 0.477 | 0.275 | 0.159 | 0.091 | 0.053 |
| 77.33 | 17.36 | 1.584 | 0.871 | 0.479 | 0.264 | 0.145 | 0.080 | 0.044 |
| 68.00 | 34.84 | 1.006 | 0.770 | 0.589 | 0.451 | 0.345 | 0.264 | 0.202 |

(b)

Tabla 9. Cálculo de IFI

Una vez calculados estos parámetros, y usando la ecuación 8, se calculan los valores estimados de fricción F para cualquier velocidad S. Estos valores se presentan en la tabla 9, y de forma gráfica en la figura 13.

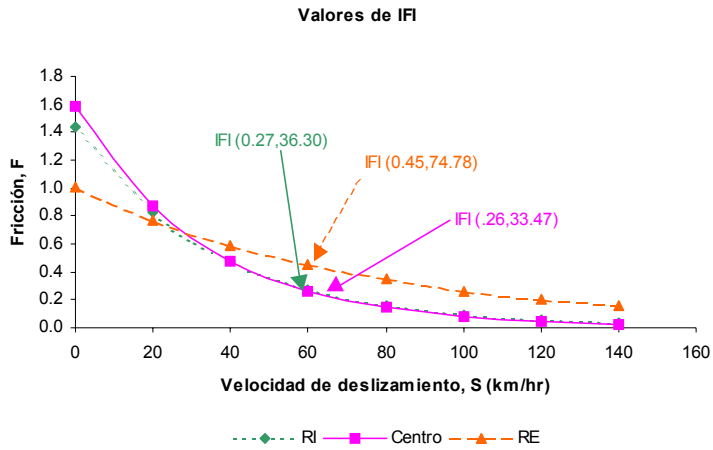


Figura 13. Representación gráfica de valores de IFI, siendo RI = rodera interna y RE = rodera externa

De esta manera se procederá en todas las mediciones que a continuación se presentan representado gráficamente en las figuras 14 a la 23.

L

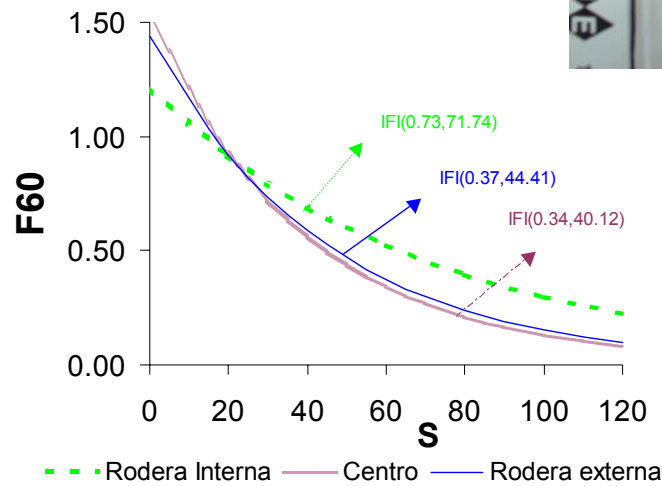
Parque Industrial Bernardo Quintana

Comentarios:

La textura se observa pulida, por tanto sus valores de Sp dan en promedio debajo de 50 km/h a excepción de la rodera interna la cual presentada ralladuras producto de un mal procedimiento constructivo



(a)



(b)

| Perfil | ϕ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR60 | Velocidades, S, km/h | | | | | | |
|---------|-------------------|-------------|------------|------|-------|-------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| R. Int. | 35.25 | 0.73 | 71.74 | 0.53 | 84.00 | 41.84 | 1.21 | 0.92 | 0.69 | 0.53 | 0.40 | 0.30 | 0.23 |
| Centro | 44.75 | 0.46 | 40.12 | 0.34 | 85.67 | 24.63 | 1.52 | 0.93 | 0.56 | 0.34 | 0.21 | 0.13 | 0.08 |
| R. Ext. | 43 | 0.49 | 44.41 | 0.37 | 85.00 | 27.57 | 1.44 | 0.92 | 0.59 | 0.37 | 0.24 | 0.15 | 0.10 |

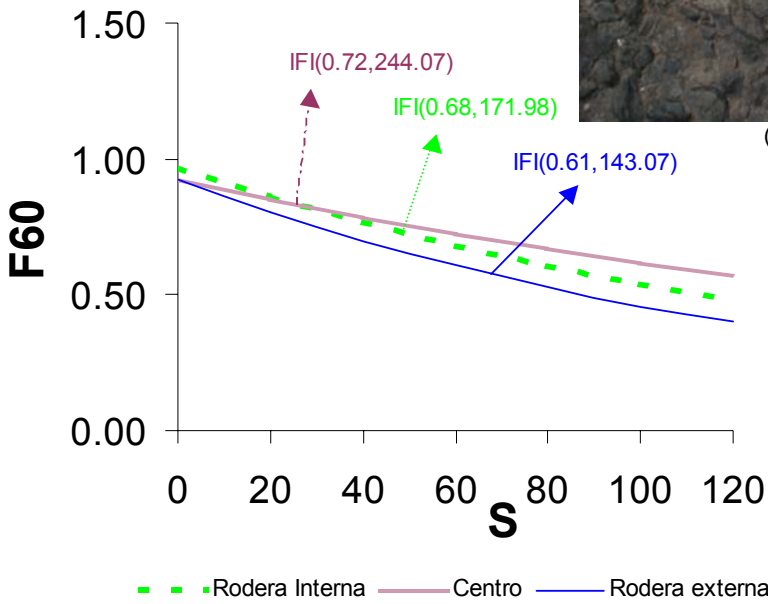
(c)

Figura 14. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los tres perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

San Fandila – IMT

Comentarios:

Observamos una textura abierta, ya que el pavimento cuenta con un riego de sello (correctamente aplicado), lo que repercute en el valor de Sp dando un promedio arriba de 100 km/h



(b)

| Lugar | φ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR60 | Velocidades, S, km/h | | | | | | |
|---------|-----------|----------|---------|------|-------|-------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| R. Int. | 23.75 | 1.616 | 171.98 | 0.68 | 75.67 | 56.58 | 0.97 | 0.86 | 0.77 | 0.68 | 0.61 | 0.54 | 0.48 |
| Centro | 20.13 | 2.25 | 244.07 | 0.72 | 74.00 | 60.29 | 0.93 | 0.85 | 0.79 | 0.72 | 0.67 | 0.61 | 0.57 |
| R.Ext. | 25.88 | 1.361 | 143.07 | 0.61 | 70.00 | 49.35 | 0.92 | 0.80 | 0.70 | 0.61 | 0.53 | 0.46 | 0.40 |

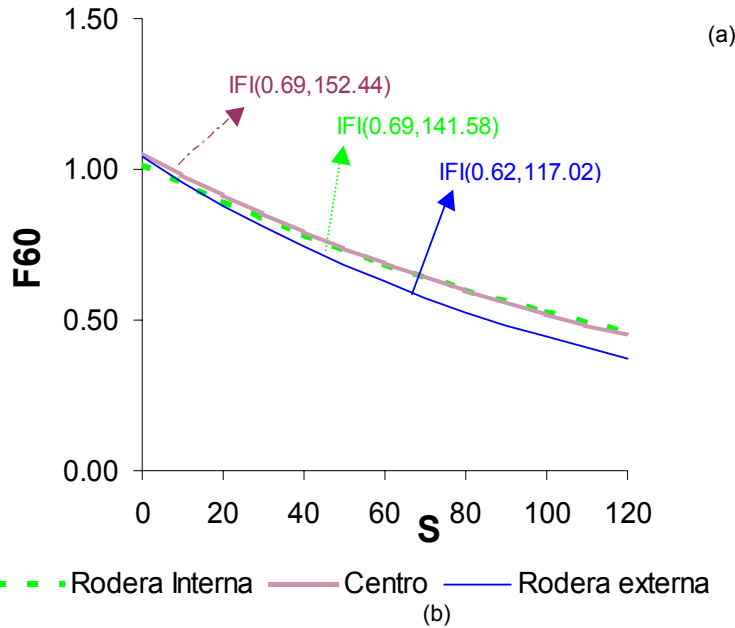
(c)

Figura 15. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los tres perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

IMT – La Venta

Comentarios:

Aquí también observamos una textura abierta, ya que el pavimento cuenta con un riego de sello (correctamente aplicado), lo que repercute en el valor de Sp dando un promedio arriba de 100 km/h, solo que en este caso presenta mayor fricción debido que existe un menor número de vehículos transitando que en el tramo San Fandila - IMT



| Lugar | φ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR60 | Velocidades, km/h | | | | | | |
|---------|-----------|----------|---------|------|-------|-------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| R. Int. | 79.00 | 1.444 | 152.44 | 0.69 | 79.00 | 56.91 | 1.02 | 0.89 | 0.78 | 0.69 | 0.60 | 0.53 | 0.46 |
| Centro | 81.33 | 1.348 | 141.58 | 0.69 | 81.33 | 57.13 | 1.05 | 0.92 | 0.79 | 0.69 | 0.60 | 0.52 | 0.45 |
| R.Ext. | 78.33 | 1.132 | 117.02 | 0.63 | 78.33 | 51.09 | 1.04 | 0.88 | 0.74 | 0.63 | 0.53 | 0.44 | 0.37 |

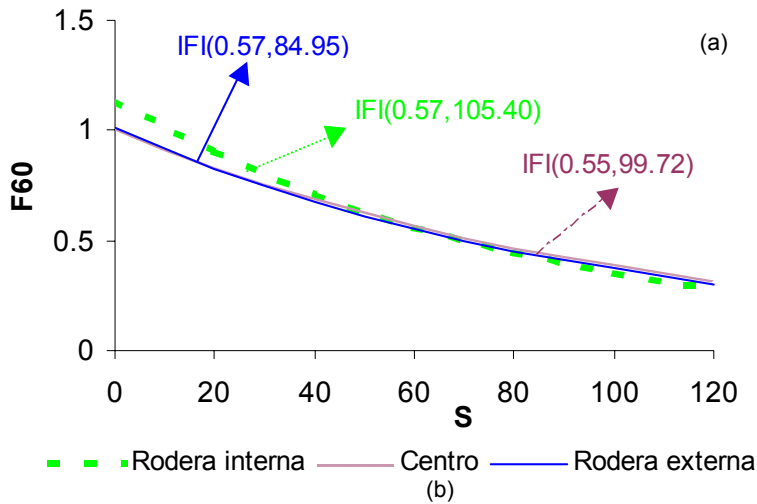
(c)

Figura 16. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los tres perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

La Venta – Pedro Escobedo

Comentarios:

La textura se observa abierta, como en los dos casos anteriores el pavimento cuenta con un riego de sello, solo que el material no se encuentra totalmente expuesto por un excedente de asfalto, lo que repercute en el valor de Sp dando un promedio de 90 km/h, este caso presenta una fricción alta debido al bajo volumen de vehículos que transitando que en el tramo San Fandila - IMT



| Perfil | φ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR60 | Velocidades, km/h | | | | | | |
|---------|-----------|----------|---------|------|-------|-------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
| R. Int. | 32.8 | 0.85 | 84.95 | 0.57 | 82.00 | 45.52 | 1.15 | 0.91 | 0.72 | 0.57 | 0.45 | 0.35 | 0.28 |
| Centro | 29.8 | 1.03 | 105.40 | 0.57 | 74.00 | 46.05 | 1.01 | 0.83 | 0.69 | 0.57 | 0.47 | 0.39 | 0.32 |
| R.Ext. | 30.5 | 0.98 | 99.72 | 0.55 | 73.33 | 44.42 | 1.01 | 0.83 | 0.68 | 0.55 | 0.45 | 0.37 | 0.30 |

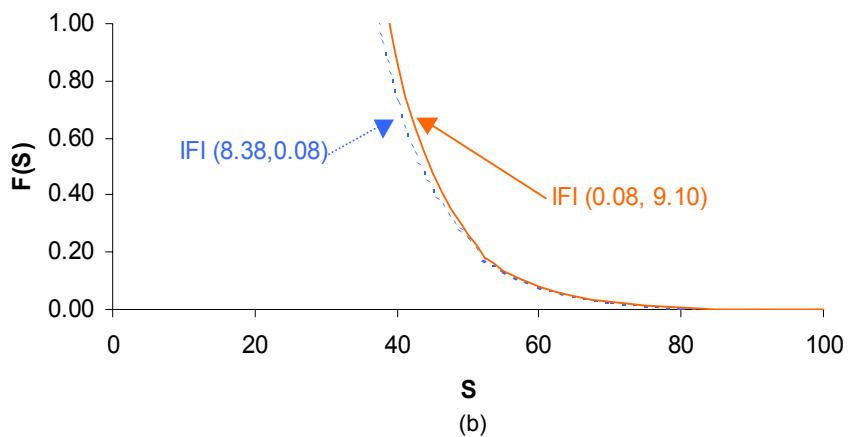
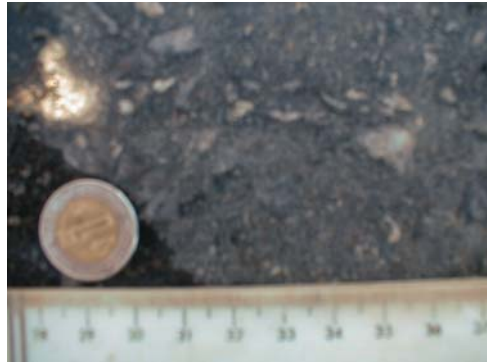
(c)

Figura 17. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los tres perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

Carretera Ciudad Victoria - Monterrey Km. 268+000 de la Ruta 85

Comentarios:

Observamos una textura cerrada, repercutiendo en el valor de Sp dando un promedio abajo de 10 km/h, presentando también una fricción baja debido que se utilizó material pétreo de origen calizo, lo que produce un pulimento acelerado de la superficie, con diámetros promedio de circulo de arena de 70 μ m.



| Perfil | ϕ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR6 0 | Velocidades, km/h | | | | | |
|--------|-------------------|-------------|------------|------|------|----------|-------------------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| R. Int | 70.75 | 0.18 | 9.10 | 0.08 | 64.3 | 0.26 | 58.38 | 6.48 | 0.72 | 0.08 | 0.01 | 0.00 |
| R. Ext | 72.00 | 0.18 | 8.38 | 0.08 | 65.3 | 0.17 | 101 | 9.33 | 0.86 | 0.08 | 0.01 | 0.00 |

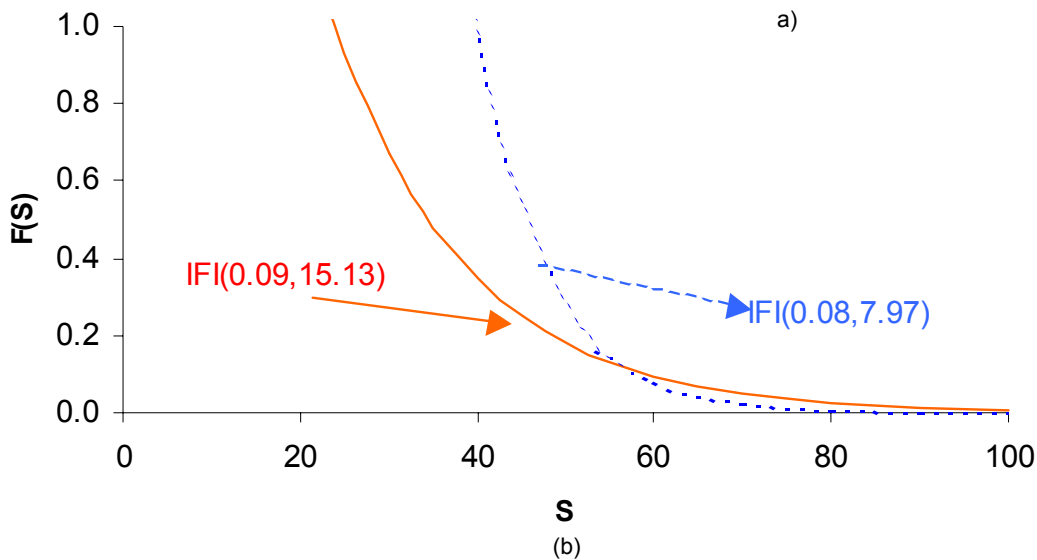
(c)

Figura 18. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

Carretera Monterrey - Reynosa Km. 23+000 de la Ruta 40

Comentarios:

Observamos aquí también, una textura cerrada, repercutiendo en el valor de Sp dando un promedio abajo de 15 km/h, presentando también una fricción baja debido que se utilizó material pétreo de origen calizo, lo que produce un pulimento acelerado de la superficie, con diámetros promedio de círculo de arena de 65 cm.



| Lugar | ϕ Prom cm | Tx H(mm) | Sp km/h | F60 | FRs | FR60 | Velocidades, km/h | | | | | |
|-------|----------------|----------|---------|------|------|-------|-------------------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| R Int | 62.25 | 0.2352 | 15.1 | 0.09 | 55 | 2.019 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.09 | 0.35 | 1.30 |
| R Ext | 72.75 | 0.1722 | 7.97 | 0.08 | 54.7 | 0.103 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.08 | 0.96 | 11.9 |

(c)

Figura 19. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

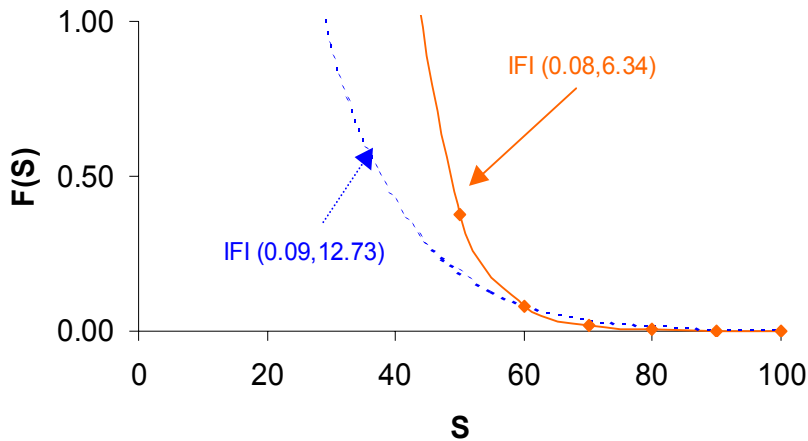
Carretera Matehuala - Saltillo Km. 207 Ruta:57 (Después de Caseta)

Comentarios:

Observamos una textura cerrada, repercutiendo en el valor de S_p dando un promedio sumamente bajo, presentando también una fricción baja debido que se utilizó material pétreo de origen calizo, lo que produce un pulimento acelerado de la superficie, con diámetros promedio de círculo de arena de 100 μ m.



(a)



(b)

| Lugar | ϕ Prom cm | Tx H(mm) | FRs | FR60 | Sp | F60 | Velocidades, km/h | | | | | |
|-------|----------------|----------|------|-------|-------|-------|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| R Int | 98.5 | 0.09 | 75.3 | 3E+25 | -0.92 | 2E+23 | 1E-5 | 3E+4 | 8E+13 | 2E+23 | 7E+32 | 2E+42 |
| R Ext | 101.5 | 0.09 | 61.7 | 8E+15 | -1.54 | 6E+13 | 7E-4 | 3E+2 | 1E+08 | 6E+13 | 2E+19 | 1E+25 |

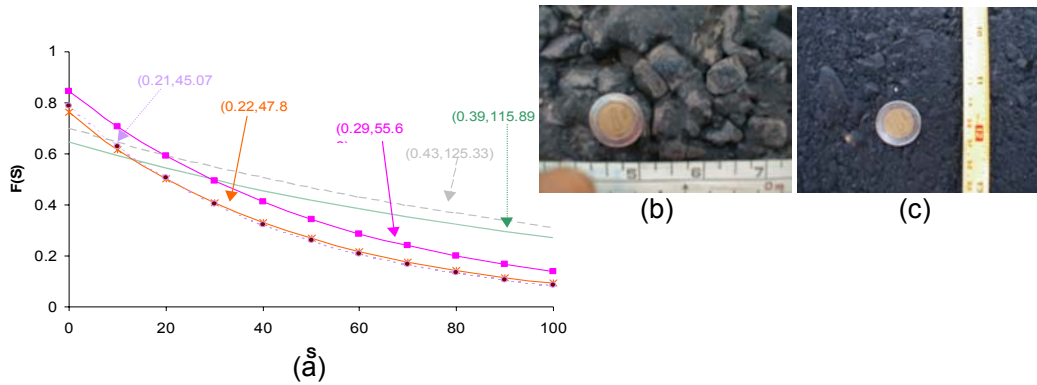
(c)

Figura 20. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

Carretera: Ciudad Victoria - Monterrey Km. 211+000 de la Ruta 85

Comentarios:

Observamos una textura abierta repercutiendo en el valor de Sp dando un promedio de 100 km/h, más esta textura proviene de la disgregación de la superficie de pavimento y el nivel de fricción alto se debe también a los severos agrietamientos y desprendimientos de carpeta. En la figura 21 (a), se puede observar una textura distinta entre el pavimento nuevo y el viejo. Aún cuando el pavimento nuevo tiene escasos dos días de haber sido colocado presente una superficie cerrada con una profundidad 0.5 mm lo cual permite un máximo de velocidad de operación de 45 km/h, para una carretera esta destinada a ser de 65 km/h.



| Pavimento | Lugar | ϕ Prom cm | Tx H(mm) | FRs | FR60 | Sp | F60 | Velocidades, km/h | | | | | |
|-----------|--------|----------------|----------|------|------|--------|------|-------------------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Viejo | R Int | 28.5 | 1.12 | 67.0 | 43.5 | 115.89 | 0.39 | 0.65 | 0.55 | 0.46 | 0.39 | 0.33 | 0.27 |
| | Centro | 39.25 | 0.59 | 72.7 | 29.6 | 55.62 | 0.29 | 0.85 | 0.59 | 0.41 | 0.29 | 0.20 | 0.14 |
| | R Ext | 27.5 | 1.20 | 75.0 | 50.3 | 125.33 | 0.43 | 0.70 | 0.60 | 0.51 | 0.43 | 0.37 | 0.32 |
| Nuevo | R Int | 41.75 | 0.523 | 56.0 | 19.7 | 47.81 | 0.22 | 0.76 | 0.50 | 0.33 | 0.22 | 0.14 | 0.09 |
| | R Ext | 42.75 | 0.499 | 55.7 | 18.4 | 45.07 | 0.21 | 0.79 | 0.51 | 0.32 | 0.21 | 0.13 | 0.09 |

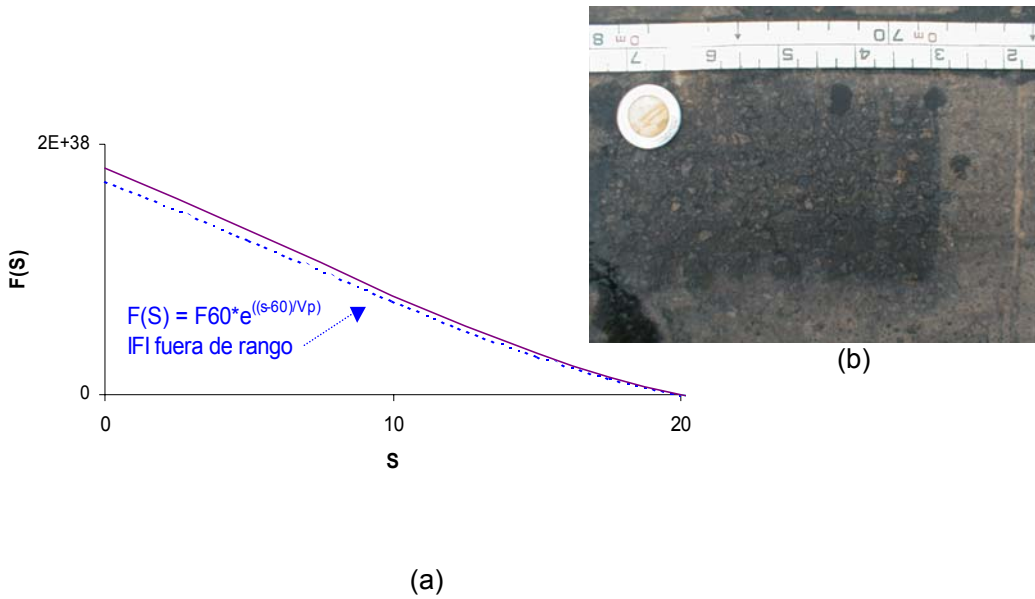
(d)

Figura 21. Comportamiento del modelo en los perfiles(a), así como la apariencia representativa del pavimento nuevo (b) y el viejo(c). Además de la tabla de valores para obtener las curvas (d).

Carretera: Monterrey - Ciudad Mier Km. 10+000 de la Ruta 54

Comentarios.

En la figura 22, podemos observar un comportamiento distinto al de la línea de tendencia, y esto es debido a que los valores de Sp y F60 se salen del rango del modelo, debido a una superficie excesivamente pulida. Los diámetros del círculo de arena, como puede observarse en la tabla c de dichas figuras, dieron alrededor de 100 cm.



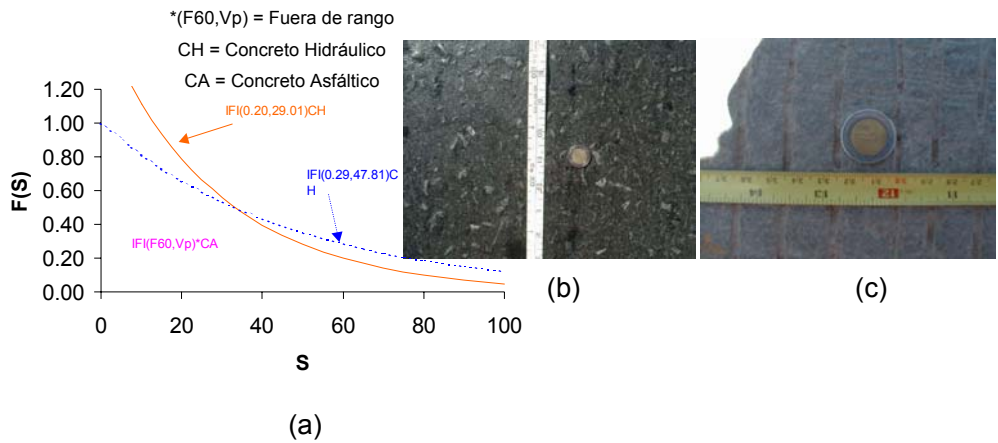
| Lugar | φ Prom cm | Tx H(mm) | FRs | FR60 | Sp | F60 | Velocidades, km/h | | | | | |
|--------|-----------|----------|------|-------|-------|-------|-------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| R. Int | 100 | 0.091 | 51.7 | 2E+19 | -1.24 | 1E+17 | 1E-4 | 1199.2 | .3E+10 | 1E+17 | .5E+24 | 2.E+31 |
| R. Ext | 100 | 0.091 | 55.0 | 2E+19 | -1.24 | 1E+17 | 1E-4 | 1276.6 | .4E+10 | 1E+17 | .6E+24 | .5E+13 |

Figura 22. Se presenta la apariencia representativa del pavimento (a), el comportamiento del modelo en los perfiles (b), así como la tabla de valores para obtener las curvas (c).

Carretera: Matehuala - Saltillo Km.126 Ruta:57 (Frente Gasolinera)

Comentarios:

En la figura 23 se aprecia claramente el comportamiento de dos tipos de acabados. En este caso el pavimento con superficie de concreto asfáltico presenta una superficie muy pulida con una profundidad de 0.08 mm para desalojo del agua y resistencia al deslizamiento de 56.8, lo cual nos proporciona como resultado valores fuera rango. El concreto hidráulico a su vez, nos arroja valores de resistencia al deslizamiento más altos –de 84 a 95- que el del pavimento de concreto asfáltico, pero su acabado no es del todo bueno, ya que tiene una profundidad de desalojo de agua de 0.35 a 0.50 mm, obteniéndose con estos resultados una velocidad de proyecto máxima de 47 km/h.



n

| Pavimento | Lugar | φ Prom cm | Tx H(mm) | FRs | FR60 | Sp | F60 | Velocidades, km/h | | | | | |
|-----------|-------|-----------|----------|-------|---------|-------|--------|-------------------|--------|--------|--------|-------|---------|
| | | | | | | | | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Concreto | R Int | 50.50 | 0.36 | 95.00 | 16.95 | 29.01 | 0.20 | 1.57 | 0.39 | 0.39 | 0.20 | 0.10 | 0.05 |
| | R Ext | 41.75 | 0.52 | 83.33 | 29.29 | 47.81 | 0.29 | 1.00 | 0.43 | 0.43 | 0.29 | 0.19 | 0.12 |
| Asfáltico | R Int | 109.50 | 0.08 | 56.33 | 1.3E+9 | -2.95 | 8.9E+6 | 0.01 | 1E+4 | 1E+4 | 8.9E+6 | 8E+9 | 6.8E+12 |
| | R Ext | 106.25 | 0.08 | 56.67 | 5.4E+10 | -2.42 | 3.8E+8 | 0.01 | 9.8E+4 | 9.8E+4 | 3.8E+8 | 2E+12 | 5.9E+15 |

(d)

Figura 23. Comportamiento del modelo en los perfiles (a), la apariencia representativa del pavimento asfáltico(b) y del pavimento de concreto hidráulico (c), además de la tabla de valores para obtener las curvas (d).

7. GRAFICAS DE ACEPTACION 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 tipo de carretera. Para ello se utiliza un diagrama que relaciona en los ejes a los valores de textura, Tx con los valores de fricción, FRs. Lo anterior aplica para cualquier equipo utilizados para medir dichos parámetros. En el diagrama se ubican la curva que definirá la frontera de valores mínimos permisibles, de fricción (curva F) y la línea T relacionada con el valor mínimo recomendado de textura.

En la figura 24 se muestra como debe interpretarse cada zona de la gráfica y así poder considerar si el tramo en estudio tiene o no las características adecuadas de fricción y textura.

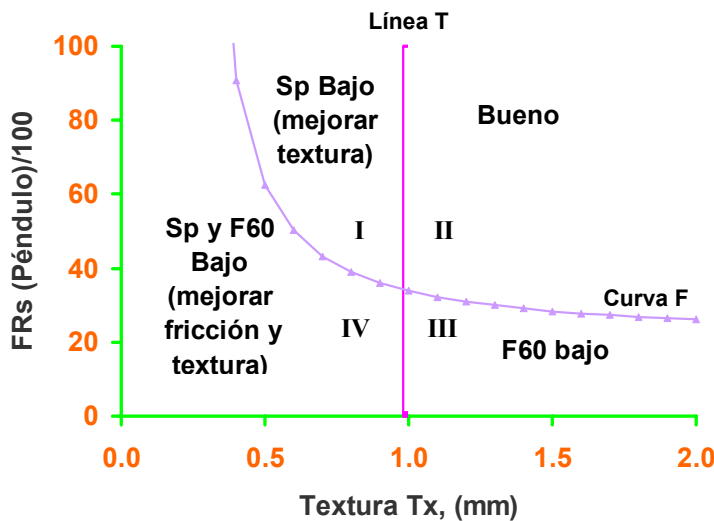


Figura 24. Interpretación de las zonas del diagrama de Fricción vs. Macrotextura

Esta gráfica puede servir 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 interpretación de cada uno de los cuadrantes en la figura 24 es la 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 hidráulico cuidando que cuente con un buen rayado).
- IV. En el cuarto cuadrante, se presenta la situación más crítica del pavimento, ya que se requiere mejorar ambas, micro y macrotextura.

La definición de los materiales mínimos de fricción (curva F) y de textura (línea T) necesita de la definición, de parte de los administradores de la conservación de la red carretera en cuestión de los valores de intervención del IFI, que denotaremos de la siguiente manera

IFI* (F60*, Sp*)

Una vez definidos los dos valores que conforman el IFI* se procede de la siguiente forma determinar la curva F y la línea T.

Primeramente elija su dispositivo para medición de textura, Tx, y aplique las constantes a y b, de la tabla 4, según corresponda. Usando la ecuación 5 y dado que conocemos Sp*, entonces la línea T se define con la ecuación:

$$T_{x_{\min}} = (Sp^* - a)/b \quad (\text{Ec. 12})$$

Para la definición de la curva F, sustituimos la ecuación 6 en 7 para obtener:

$$F60^* = A + B FR_{\min} e^{\frac{S-60}{Sp}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Y como $Sp = a + b Tx$, entonces:

$$F60^* = A + B FR_{\min} e^{\frac{S-60}{a+bTx}} \quad (\text{Ec. 14})$$

de donde despejando finalmente FR_{\min} para establecer la forma matemática de la curva F:

$$FR_{\min} = [(F60^* - A) e^{\frac{S-60}{a+bTx}}] / B \quad (\text{Ec. 15})$$

Para el caso particular de utilizar el círculo de arena (en la medición de la textura) y el péndulo británico para la fricción, las constantes tienen los valores siguientes:

$$a = -11.59 \quad b = 113.63 \quad A = 0.078 \quad B = 0.01071$$

Por lo que las ecuaciones de referencia para las curvas F y la línea T queda:

$$Tx_{\min} = (Sp^* + 11.59) / 113.63$$

$$FR_{\min} = [FR_{\min} = [(F60^* - 0.078) e^{\frac{10-60}{-11.59+113.63Tx}}] / 0.01071$$

Si precisamos, a manera de ejemplo, los valores de interención de IFI* tal que $F60^* = 0.3$ y $Sp^* = 100$ km/h, entonces las ecuaciones anteriores nos darían:

$$Tx_{\min} = 0.98$$

$$FR_{\min} = [(20.73 - 0.078) e^{\frac{10-60}{-11.59+113.63Tx}}] / 0.01071$$

cuya representación gráfica se presenta en la figura 25:

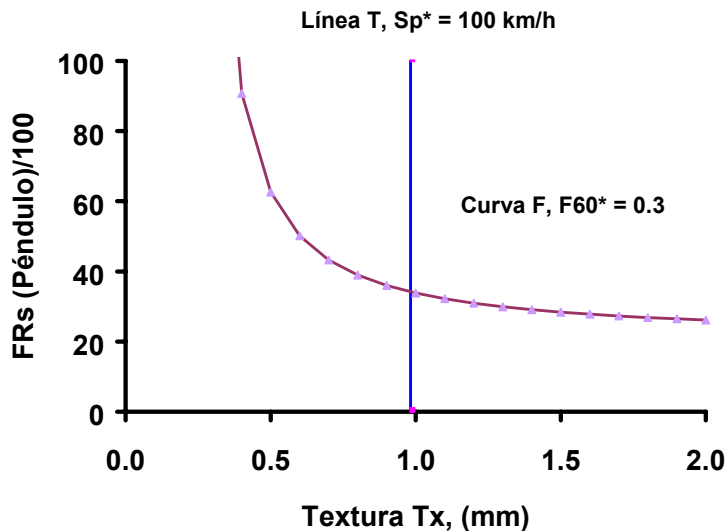


Figura 25. Ejemplo de representación gráfica de los límites para aceptación o rechazo

En las figuras 26 a la 36 veremos el comportamiento en algunos de los casos de Querétaro y Monterrey, estableciendo los límites anteriormente mencionados.

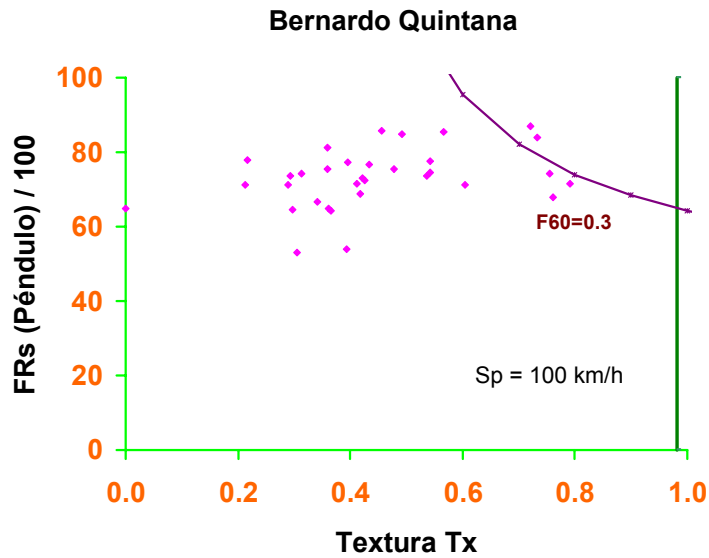


Figura 26. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 46.8 cm y de las lecturas del péndulo de 73.1

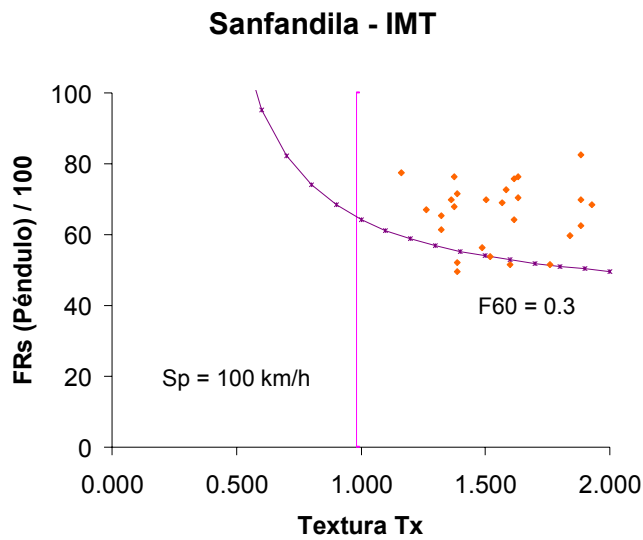


Figura 27. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 23.5 cm y de las lecturas del péndulo de 66.16

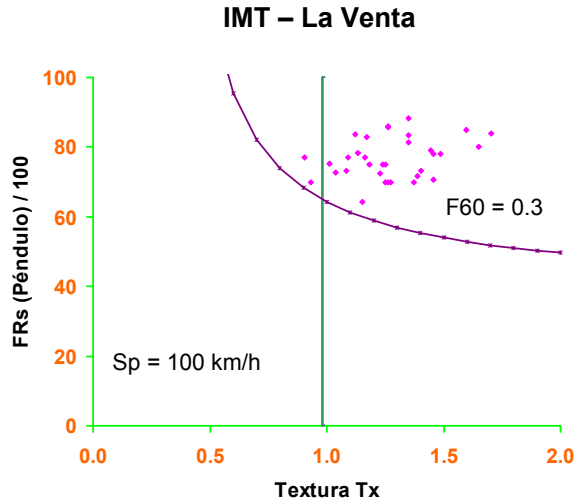


Figura 28. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 26.9 cm y de las lecturas del péndulo de 76.8

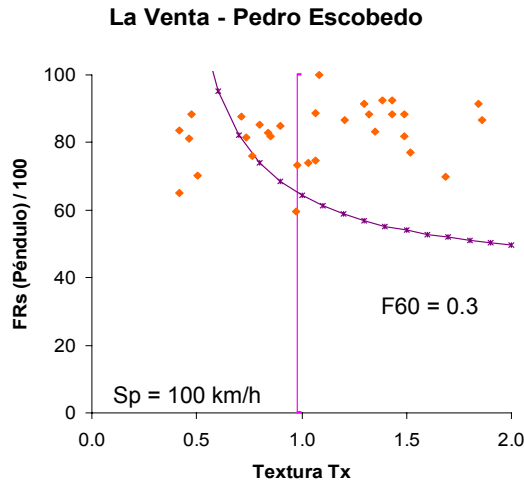


Figura 29. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 83.8 cm y de las lecturas del péndulo de 30.64

En las gráficas anteriores (fig. 27 a la 29) es posible observar los tramos caen según el modelo, dentro de la tolerancia de un buen tramo (para un $Sp = 100 \text{ km/h}$ y un $F60 = 0.3$). En el tramo de Bernardo Quintana (fig.26), la mayoría de los puntos se encuentran fuera de estos límites de tolerancia, por lo que se sugiere mejorar la macrotextura. Por otra parte, también debe mencionarse que la velocidad de operación en este tramo es de 40 km/h , así que si nuestro Sp fuera igual a 40 km/h , entonces cumpliría una cierta parte de los puntos, pero aún así la gran mayoría quedan fuera de la tolerancia del modelo.

En los casos de la Carretera Mty - Cd. Mier Km 10+000 de la Ruta 54 y el libramiento NW Monterrey Km 1+000 de la ruta México – NL, presentan una superficie demasiado pulida por lo cual los puntos no se presentan dentro de los límites establecidos para diferenciar un tramo de otro. En la figura 30 se puede visualizar esta situación.

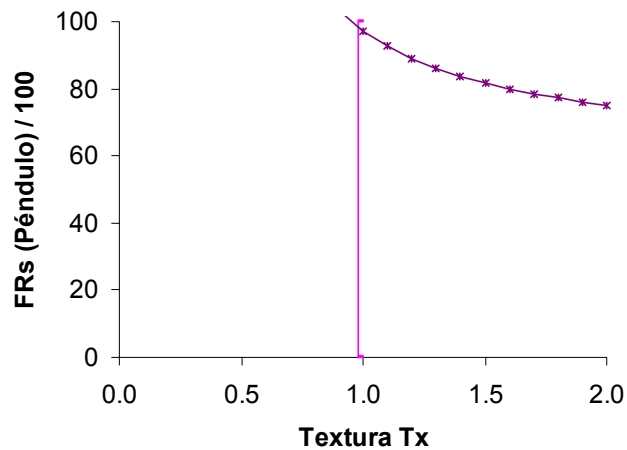


Figura 30. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro del círculo de arena fue entre 99.6 y 101cm, mientras que las lecturas del péndulo andaban entre 54.2 y 59.7.

Carr. Cd. Victoria - Mty Km 268+000 de la Ruta 85

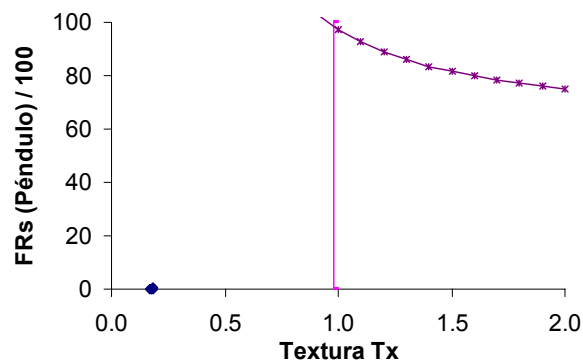


Figura 31. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 64.9 cm y de las lecturas del péndulo de 71.6

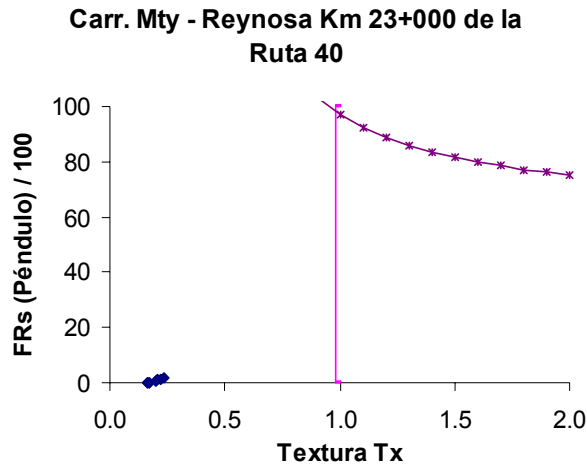


Figura 32. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 60.3 cm y de las lecturas del péndulo de 56.2

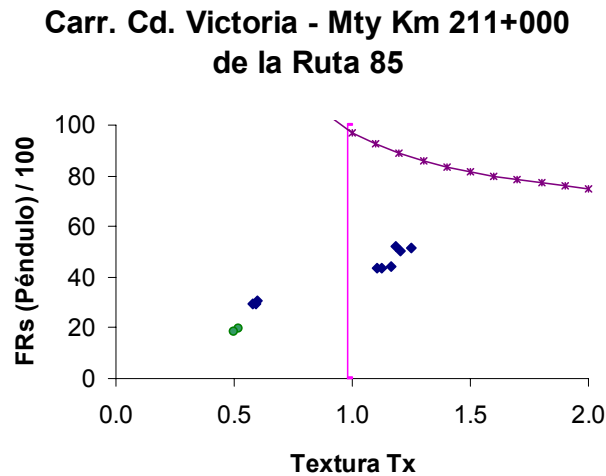


Figura 33. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 31.7 cm y de las lecturas del péndulo de 72.3 - para el caso de pavimento nuevo- y el diámetro promedio del círculo de arena fue de 42.3 y de las lecturas del péndulo 55.8 - para pavimento viejo.

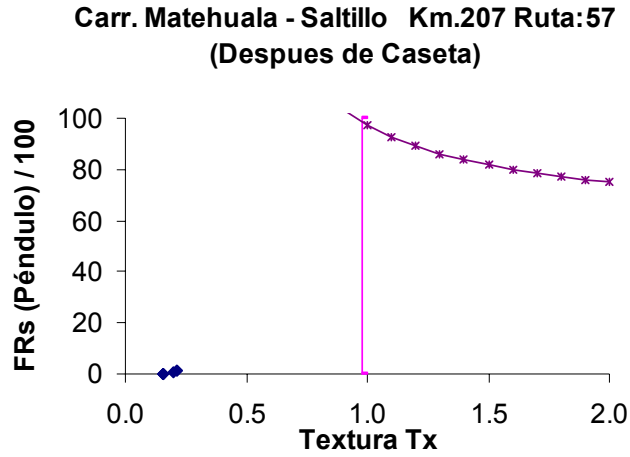


Figura 34. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue de 71.1 cm y de las lecturas del péndulo de 66.6

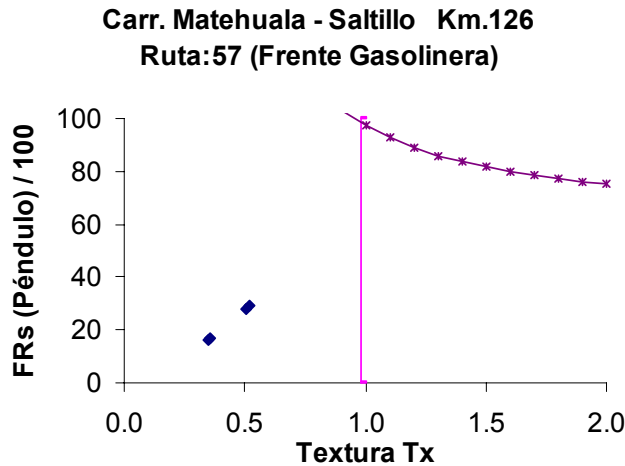


Figura 35. Curva de aceptación o rechazo. Diámetro promedio del círculo de arena fue 108.4 cm y de las lecturas del péndulo de 56.8 –para pavimento asfáltico- y un diámetro promedio de 46.4 cm y la lectura del péndulo de 89.33 – para pavimento de concreto hidráulico-

Un seguimiento en el curso del tiempo para un tramo dado permitirá al administrador de la conservación de una red carretera fundamentar su toma de decisiones para las intervenciones necesarias para mejorar las condiciones de fricción y macrotextura. Para un tramo hipotético podríamos tener la evolución de las condiciones de micro y macro textura de manera similar como se aprecia en la figura 36.

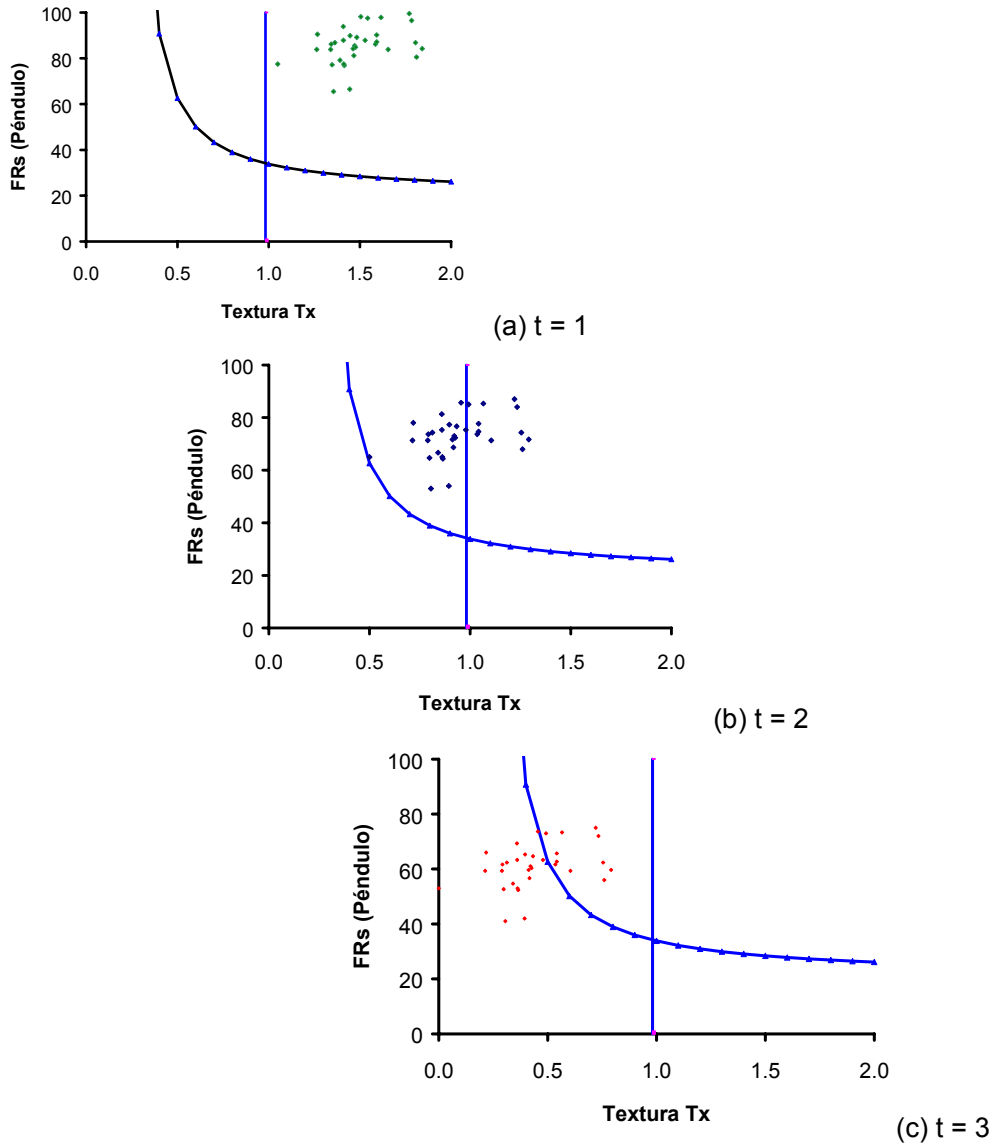


Figura 36. Evolución hipotética, a través del tiempo, de la fricción y textura. Con material pétreo sano.

La toma de decisiones deberá realizarse antes de llegar a la condición más crítica como es el caso del inciso c, de la figura 36. O cuando contamos con material calizo o con fácil tendencia al pulido como en la figura 37.

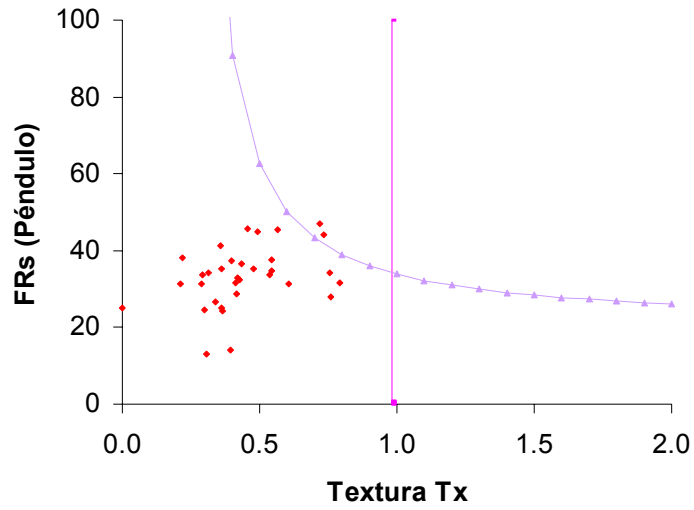


Figura 37. Ejemplo de un caso crítico de material con alta facilidad al pulimento.

8. CONCLUSIONES

8.1. GENERALES

La principal ventaja es que se tendrá una escala común de valores de fricción y textura, denominado IFI, en la que se engloben los resultados de medidas de fricción en pavimentos de carreteras y aeropuertos con una precisión aceptable.

Este índice puede ser utilizado como parámetro de evaluación superficial para incrementar la seguridad de la operación vehicular.

Los sistemas de administración de carreteras podrán recibir informes sobre las condiciones de fricción en una escala idéntica en cualquier región o país, así como el tipo de pavimento (flexible o rígido).

Se comprobó que la utilización de la textura no sólo da mejores correlaciones, sino que reduce los errores y la dispersión en los equipos. Esto se nota aún más cuando aumenta la velocidad de deslizamiento, constituyendo uno de los motivos para utilizar 60 km/h en vez de una velocidad de deslizamiento más baja.

Los contratistas que deseen trabajar en el extranjero podrán adaptarse a las especificaciones basadas en métodos de control locales.

Los técnicos e investigadores tendrán un claro conocimiento de los fenómenos del deslizamiento y de los efectos de la textura.

8.2. LIMITANTES DEL MODELO

No es posible llegar a clasificar con absoluta soltura, por categorías de calidad, la fricción de un pavimento en función del IFI.

Las constantes pueden variar con respecto al tiempo, así que será necesario hacer una calibración anual (como mínimo) con alguno de los equipos participantes.

No es posible tener una forma de calibración práctica y tangible como en el caso del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

8.3. CUESTIONES PENDIENTES

Existe un IFI para cada punto donde se ha medido la fricción y la macrotextura, pero es necesario establecer un criterio de obtención del IFI por tramo, que pudiera ser el hectómetro por homogeneidad con el IRI, y definirse por la medida de los IFI parciales obtenidos en cada punto, dependientes de la frecuencia de muestreo del equipo, recomendándose al menos 5 valores del IFI para promediar en el hectómetro.

Establecer una clasificación, de tal forma que se establezca una política de seguridad vial y de mejora de los pavimentos.

Actualmente la utilización de este índice está en estudio en diversos países para la compatibilidad con la práctica de conservación de carreteras, quedando pendiente para convertirse en norma o recomendación de amplio uso internacional.

8.4. PERSPECTIVAS

Realizar más investigación para adquirir la sensibilidad en cuanto al criterio de interpretación de los datos, y así también establecer diversos umbrales de intervención dependiendo del tipo o clase de carretera que estemos evaluando.

Debería estudiarse como afecta la forma de la textura a la fricción, para conocer que propiedades de la textura se relacionan mejor con la fricción. La profundidad de la textura podría no ser la mejor medida para los modelos de fricción.

Estudiar los equipos de medida de fricción y textura para conocer su grado de sensibilidad a la velocidad.

Realizar un estudio con diversas superficies de rodamiento (con diferentes materiales o texturas), tales como: concreto asfáltico, concreto hidráulico y diversos tipos de tratamientos superficiales que se aplican en el país.

REFERENCIAS

Models to Harmonize Methods for Measuring Road Friction
J.J.Henry, M. Marasteanu
1992

Evaluación Estructural No Destructiva de Pavimentos
Publicación Técnica No. 107,
IMT-SCT

Índice Internacional de Rugosidad, Aplicaciones en la red carretera de México
Mario C. Arriaga, Paul Garnica
I.M.T., Publicación Técnica No. 108
1998

Diagnostico de las Características Superficiales de los Pavimentos
Mario C. Arriaga, Paul Garnica
I.M.T., Publicación Técnica No. 111
1998

El Índice de Fricción Internacional
Francisco Achútegui V., Ramón Crespo R.
Revista Ruta (IFI)
Madrid, España, Marzo-Abril 1996.

El Experimento Internacional de Comparación y Armonización
de las medidas de la resistencia al deslizamiento y de la textura
Francisco Achútegui V., Ramón Crespo R.
Revista Ruta (IFI)
Madrid, España, Mayo-Jubio 1996

International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance
Measurements. Draft 3, Final Report.
Dr. James C. Wambold, Dr. J.J.Henry
Permanent International Association of Road Congresses
October 1994

ANEXO A

G L O S A R I O

❖ TERMINOS RELACIONADOS CON LA FRICCIÓN

- ABS** Sistema automático de frenado (Automatic Brake System).
- BPN** Numero del péndulo Británico (British Pendulum Number).
- BPT** Prueba del péndulo Británico (British Pendulum Tester).
- CR** Coeficiente de Rozamiento Transversal (pag12).
- CHP** Chirp Tests per ASTM E-1278.
- F60** Estimado de la fricción en la curva idealizada (Golden Curve GF60) a 60 kph usando el Modelo PIARC.
- FRs** Medida de la fricción de algún equipo a una Velocidad de deslizamiento (Slip speed) "s".
- GS** Estimado de la fricción en la curva idealizada (Golden Curve) a una Velocidad de deslizamiento (Slip speed) "s" usando el Modelo PIARC.
- GF60** Fricción en la curva idealizada (Golden Curve GF60) a una Velocidad de deslizamiento de 60 km/h.
- GF(S)** Fricción en la curva idealizada (Golden Curve GF60) a una Velocidad de deslizamiento "s".
- GV** Constante de la velocidad de la curva idealizada (Golden Curve).
- IFI** Índice de Fricción Internacional.
- LOCKED (LKD)**..... Prueba con Llanta Bloqueada (Locked Wheel Tester).
- S** Velocidad de deslizamiento (Slip velocity).
- SCRIM** Coeficiente de la rueda Oblicua (Side force Coefficient Road Inventory Machine).
- SFC** Coeficiente de la Rueda Oblicua (Side Force Coefficient).
- SLIP (SLP)** Prueba con llanta Parcialmente bloqueada (Fixed SlipTester).
- SN** Numero de Derrapamiento o Deslizamiento (Skid Number)
- SRT** Prueba para la resistencia al derrapamiento o deslizamiento (Skid Resistance Tester) para equipos como el BPT.

SWP Barrido continuo con un ángulo de deslizamiento (Continuous sweep through slip angles).

P.I.A.R.C. Permanent International Association of Road Congresses (Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras)

ULT Fricción última en pavimento seco a baja velocidad (Ultimate friction on dry pavement at low speed).

V Velocidad del vehículo (Vehicle speed).

V_p Estimado de la Constante de la velocidad de referencia (speed constant) de la curva idealizada usando el modelo PIARC.

❖ TERMINOS RELACIONADOS CON LA TEXTURA

MPD..... Profundidad promedio del perfil (Mean Profile Depth).

MTD..... Medida volumétrica de la profundidad promedio de la textura (Mean Texture Depth).

RMS..... Media de la raíz cuadrada del perfil de la textura en milímetros (Root Mean Square).

T_x Textura.

❖ TERMINOS ESTADISTICOS

MAX /E/ Máximo error absoluto (Maximun Absolute Error).

AVE /E/ Error promedio absoluto (Average Absolute Error).

RMSE promedio de la raíz cuadrada del error o Desviación estándar residual (Root Mean Square Of The Error o Sd Of The Residuals).

R Coeficiente de correlación múltiple (Multiple Correlation Coefficient).

SD Desviación estándar (Standard Deviation).

❖ TIPOS DE LLANTAS Y SISTEMAS

RIB Llanta de prueba (Ribbed).

BLANK Llanta lisa de prueba (Smooth treaded)

PATTERN (Treaded tire)

ANEXO B.

Características superficiales, influencia en la interacción vehículo-carretera

En el XVIII Congreso mundial de carreteras (Bruselas 1987) el Comité Técnico de Características Superficiales de la P.I.A.R.C, propuso una clasificación de las características geométricas y superficiales basadas en longitudes de onda y en amplitudes de las irregularidades (Tabla B.1)

| Nombre | | Rango de Dimensiones (aprox.) | |
|------------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
| | | Horizontal (λ) | Vertical |
| Microtextura | | 0 – 0.5 mm | 0 – 0.2 mm |
| Macrotextura | | 0.5 – 50 mm | 0.2 – 10 mm |
| Megatextura | | 50 – 500 mm | 1 – 50 mm |
| Regularidad Superficial (Fricción) | Onda Corta | 0.5 – 5 m | 1 – 20 mm |
| | Onda Media | 5 – 15 m | 5 – 50 mm |
| | Onda Larga | 15 – 50 m | 10 – 200 mm |

Tabla B.1. Irregularidades de un pavimento (Flexible o Rígido)

Hay que tener en cuenta que las características superficiales de los pavimentos que más interesan están ligadas a las dimensiones de estas irregularidades. La interacción vehículo-carretera da lugar a que estas irregularidades superficiales influyan en mayor o menor grado, dependiendo de su longitud de onda.

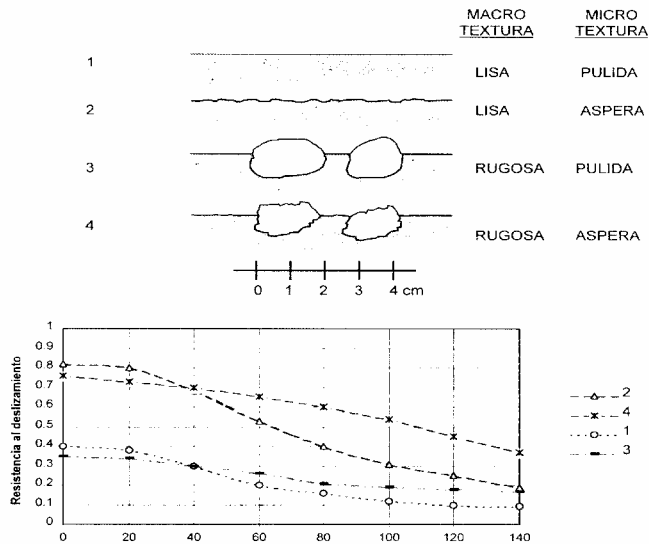


Figura B.1 Influencia de la textura y la velocidad en el coeficiente de resistencia al deslizamiento.

En la **Figura B.2** se presenta la gama de irregularidades de los pavimentos flexibles y rígidos que afectan al usuario; sin embargo, algunas de ellas son necesarias para la *seguridad* de los vehículos.

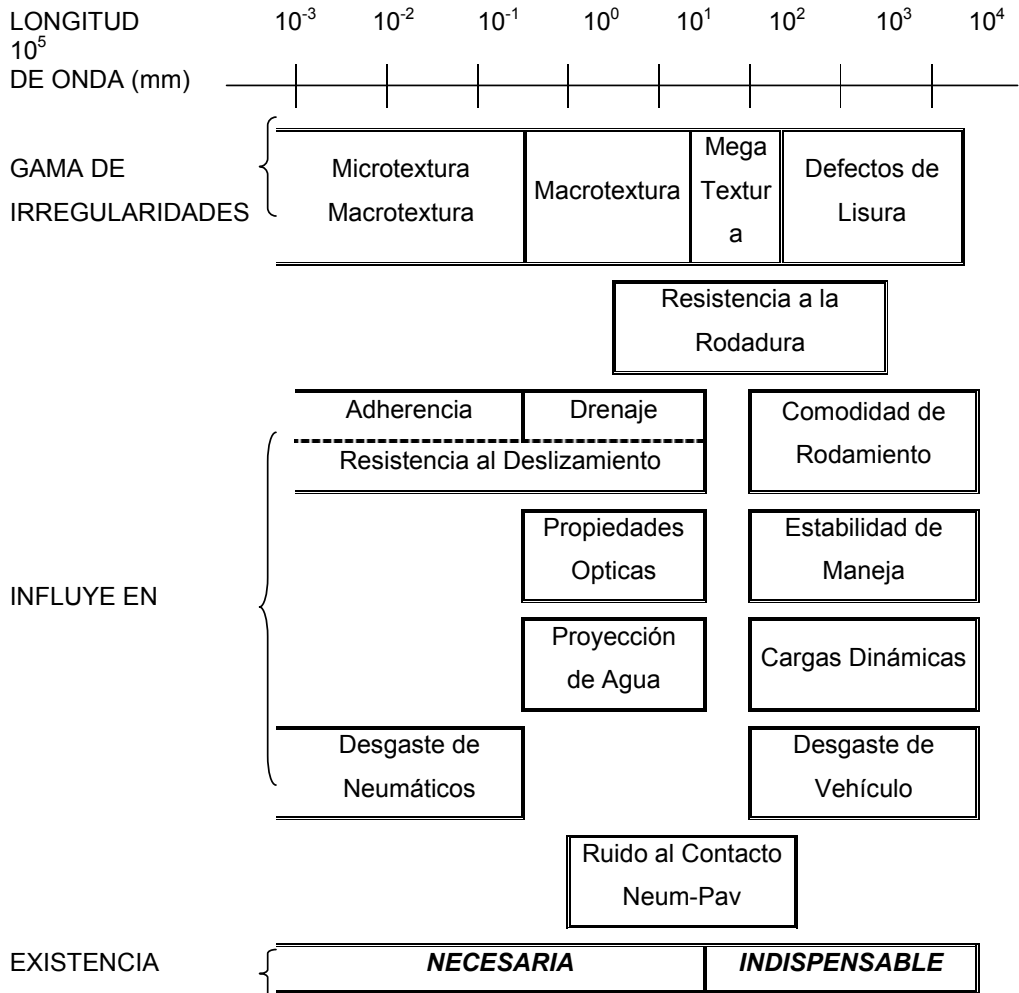


Figura B.2. Influencia de las irregularidades superficiales en los fenómenos de interacción entre el vehículo vs. carretera.

- A. Microtextura: La microtextura es función de la textura superficial de los agregados y el mortero asfáltico o del concreto hidráulico, empleados en la construcción de la carpeta o losa. Es importante para la adherencia entre el neumático y el pavimento y, por tanto, para resistencia al derrapamiento, por lo que la microtextura influye en el riesgo de accidentes para todas las velocidades de circulación. En todo caso, las irregularidades de este tipo están presentes y en ciertas condiciones su existencia es necesaria.

B. Macrotextura: La macrotextura es el relieve de la capa de rodadura y depende de la composición de la mezcla, riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficie dado a la capa de concreto (estriado, engrillado, etc.). Degradaciones tales como pérdida de gravilla, grietas y la existencia de juntas, solo contribuyen en casos poco frecuentes o si hay escalonamiento notable. En la Figura B.3 se puede observar gráficamente la diferencia entre la microtextura y la macrotextura de un pavimento.

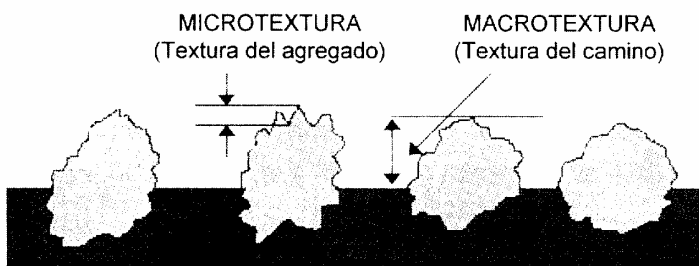


Figura B.3. Microtextura y Macrotextura.

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidad media y elevadas (mas de 60 kph) con pavimento mojado debido a que evita. La incidencia de los accidentes por Hidroplaneo, ya que al contar con una textura abierta, nos permitirá drenar el agua superficial con mayor facilidad eliminar dicho efecto y por consiguiente nos permitirá también una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redundará en una mejora en la seguridad de operación.

Además del rozamiento por deformación relacionado con la histéresis elástica del caucho, la rugosidad del pavimento nos permite restablecer la adherencia a alta velocidad. De este modo y mientras que en zonas urbanas (velocidades moderadas) es adecuada una macrotextura moderada y una microtextura áspera, en carreteras interurbanas será conveniente que exista una macrotextura rugosa.

La Macrotextura tiene una pequeña influencia en el consumo de combustible al aumentar la resistencia al rodadura, pero puede estar compensada por una ligera disminución de la velocidad de circulación. Mejora la visibilidad y las propiedades ópticas del pavimento al reducir las proyecciones del agua y producir una reflexión difusa.

La macrotextura se divide en dos: La Positiva, que es típicamente la que se obtiene a través de los tratamientos superficiales (riegos de sello). La Negativa, que se refiere a las mezclas porosas o drenantes. Ambas ofrecen, en diferente grado, las ventajas mencionadas. En cambio son muy diferentes en lo

Comentario:

HIDROPLANEO: (*I* =HYDROPLANING // *F* =HYDROPLANAGE)

◆ El efecto más importante del hidropilaneo es la reducción en el coeficiente de adhesión entre la llanta y el pavimento. Esto afecta el frenado, el control del volante y la estabilidad del vehículo. <<Theory of Ground Vehicles, J.Y.Wong1978

◆ Fenómeno por el cual las ruedas de un vehículo se elevan hidrodinámicamente y pierden el contacto con la calzada a causa de que el neumático no puede eliminar la lámina de agua existente sobre la superficie de la misma. El hidropilaneo se da en espesores de lámina de agua sobre la calzada que oscila alrededor de 5mm.

<<Diccionario de Ingeniería de Caminos, Dr. Ignacio Morilla Abad/ Ediciones pirámide, S.A., 1979// ESPAÑA>>

◆HIDRODESILIZAMIENTO:

Condición en la cual una o más ruedas de un vehículo en movimiento, quedan separadas del pavimento por una lámina de agua. Depende de una combinación de elementos, tales como el espesor de la lámina, la textura del pavimento, el peso y velocidad del vehículo, y la condición y diseño del grabado de la llanta. <<Vocabulario Vial, Ministerio de comunicaciones y transporte, Caracas 1977>>

Comentario: Página: 43 HISTERESIS Que significa Pag12/ PT111 IMT

Comentario: Página: 44 RIEGO DE SELLO (*I* = SEAL COAT // *F*= ENDUIT DE SCHELEMENT)

◆ Recubrimiento de una superficie con un ligante en estado líquido, seguido usualmente de la aplicación uniforme de un agregado fino. <<Vocabulario Vial, Ministerio de comunicaciones y transporte, Caracas 1977>>

◆ Aplicación de un ligante bituminoso para impermeabilizar la superficie sobre la que se aplica. <<Diccionario de Ingeniería de Caminos, Dr. Ignacio Morilla Abad/ Ediciones pirámide, S.A., 1979// ESPAÑA>>

referente al ruido. Mientras que con macrotextura positiva aumenta el ruido en todas las frecuencias, las mezclas porosas (Mtx. negativas) llegan a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no sólo en el contacto rueda-pavimento, sino también, el producido por el motor, por absorción acústica.

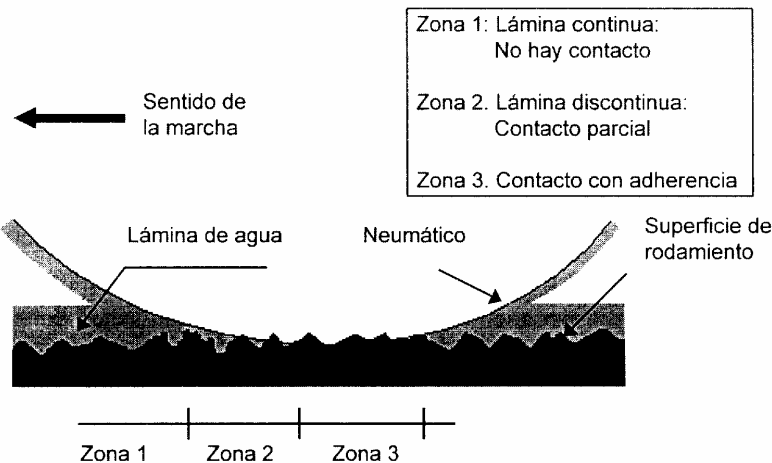


Figura B.4. Condición de contacto entre la rueda en movimiento. y una superficie mojada.

C. Megatextura: La Megatextura a irregularidades del tipo intermedio, relacionadas con la textura final y también con diversos tipos de fallas o degradaciones y sus reparaciones. Los pavimentos de adoquín pueden dar lugar a este tipo de textura.

Esta gama de irregularidades aumenta en particular la resistencia al rodamiento y el nivel de ruido con frecuencias bajas. La conducción es mas incomoda, con vibraciones y dificultades para mantener la estabilidad de marcha. Contribuye además al desgaste de los vehículos, incluidos los neumáticos, reduciendo la seguridad de los usuarios en la operación. Al contrario de lo que sucede con la microtextura y la macrotextura, las amplitudes de onda que definen la megatextura no son deseables en ningún caso

C. Regularidad Superficial: Los defectos de irregularidad superficial o *rugosidad* se reflejan en ondas de diferente longitud debidas a la puesta en obra (extensión, compactación, guiado, etc.), a deformaciones en el pavimento bajo trafico o a deformaciones en el terreno de cimentación. Estas irregularidades afectan a la comodidad del usuario por las vibraciones que se producen, el desgaste de los vehículos, efectos en la mercancía transportada, que aumentan el consumo de combustible e influyen en la estabilidad de los vehículos, reduciendo la seguridad de los usuarios en la operación del transporte.

También es importante considerar las irregularidades por deformaciones plásticas longitudinales, que afecta la conducción y la seguridad en las carreteras, conocidas con el nombre de **roderas**, medidas por la profundidad máxima en un perfil transversal respecto a la línea horizontal teórica. Valores superiores a 10 – 15 milímetros indican roderas significativas.

ANEXO C.

Medida de la Adherencia neumático – pavimento

La adherencia neumático-pavimento es un factor fundamental que interviene en la seguridad de la circulación sobre pavimentos flexibles o rígidos, ya que permite reducir la distancia de frenado y mantener, en todo momento, la trayectoria del vehículo aun en superficies de rodamiento mojado que es cuando más se agrava.

La adherencia neumático-pavimento puede definirse como “la capacidad de unión o contacto íntimo entre dichos elementos, de forma que de origen a una circulación segura”.

Las capas de rodamiento de los pavimentos carreteros tanto flexibles como rígidos y esencialmente sus agregados, deben reunir las características adecuadas para cumplir las siguientes funciones básicas desde el punto de vista de la seguridad:

- Bombeo geométrico adecuado.
- *Romper* la película de agua procedente de la lluvia, para asegurar el contacto entre el neumático y el pavimento (microtextura).
- Facilitar y contribuir al drenaje del agua existente bajo el neumático (macrotextura).
- Mantener sus características a través del tiempo.

Bajo la acción del tráfico, principalmente intenso, las características iniciales de los agregados disminuyen en el transcurso del tiempo. Así, por ejemplo, se va produciendo el pulimento del material, modificando sensiblemente la microtextura.

También la macrotextura disminuye paulatinamente, dificultando la evacuación de la película de agua procedente de la lluvia hasta que, por debajo de un determinado umbral, el drenaje está limitado casi exclusivamente a los canales (tipo de dibujo) del neumático, por lo que si la velocidad de circulación se eleva, la capacidad de drenaje del agua es insuficiente, elevando sensiblemente el riesgo de que la rueda patine o se deslice al producirse la pérdida de contacto.

Para evaluar la capacidad de resistencia al deslizamiento, se puede proceder de dos formas distintas:

- Midiendo directamente el coeficiente de fricción o rozamiento entre el neumático y el pavimento mojado.
- Analizando la macrotextura o la capacidad de drenaje superficial del pavimento (para estimar la reducción de la adherencia que se produce al aumentar la velocidad).

Comentario: Página: 46
UMBRAL: (Paso o principio de algo)
♦Valor mínimo necesario
<<Diccionario de Ingeniería de Caminos, Dr. Ignacio Morilla Abad/ Ediciones pirámide, S.A., 1979// ESPAÑA>>

Los equipos desarrollados para medir la adherencia pueden clasificarse atendiendo a diferentes razones:

- De acuerdo con el modo de desplazamiento, cabe diferenciar los equipos manuales, remolcados o incorporados a un vehículo.
- Según su velocidad de desplazamiento, pueden ser estacionarios, lentos o rápidos.
- Atendiendo a su función y método de medida, se pueden distinguir entre los equipos de medida de la textura y de la resistencia al deslizamiento.

ANEXO D.

Valores de correlaciones de R para obtener valores de GF60.

| EQUIPO | Con MPD | Con MTD |
|---------------|--------------------|--------------------|
| D8.5 | 0.968 | 0.935 |
| A12.20 | 0.960 | 0.960 |
| B7 | 0.913 | 0.923 |
| A14 | 0.874 | 0.875 |

Tabla D.1 Correlación de R para predecir el valor de GF60

