# CAPÍTULO I

# INTRODUCCION

# I.I Antecedentes

Se han efectuado diferentes investigación y trabajos relacionados con la resistencia al deslizamiento, los coeficientes de fricción y la, textura de los pavimentos; en fin, de los diferentes parámetros con los que se evalúan las características superficiales de los pavimentos en diferentes países; incluyendo México, pero de forma aislada y sin poder tener una visión global o comparativa entre los diferentes métodos empleados. Además, la operación de los equipos e interpretaciones de sus resultados dependía de la experiencia que tuviera la persona encargada de cada estudio.

Una de las instituciones que más a aportado, al respecto, es el Instituto de Transporte de Pennsylvania, de la Universidad del Estado de Pennsylvania, donde se ha propuesto un manual sobre la resistencia al deslizamiento[illegible] y un modelo matemático de la resistencia al deslizamiento, como una función de la velocidad[illegible], en donde se representa la relación entre la fricción (F) y la velocidad de deslizamiento (S) de la llanta de prueba.

Así también, se han efectuado estudios sobre las limitaciones del uso del Skid Number (SN) en el análisis de accidentes y los sistemas de administración de pavimentos[illegible], en donde se propone el uso del $SN_{40}$,

como coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento, para tratar de estimar la velocidad del vehículo o estimar la distancia de frenado; sin embargo, estas consideraciones no son muy exactas para el caso de los camines o autobuses (Figura 1.1).

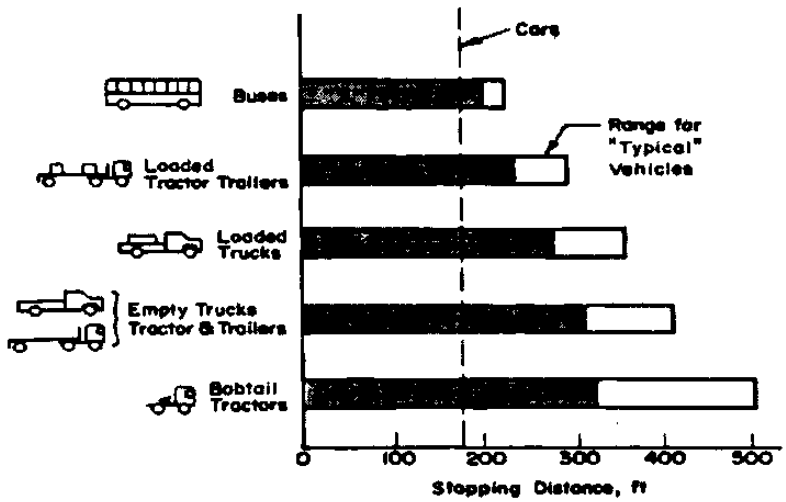



***Figura 1.1*** *Distancias de frenado estable de 60 mph (96 kph) en pavimento seco*

En México, por lo menos desde 1977, sólo se ha venido considerando el parámetro de la fricción como un valor definido por las investigaciones realizadas por la AASHO, el cual está afectado por un valor de seguridad. Dichos valores se ocupan aún actualmente para la realización de proyectos geométricos en las carreteras mexicanas.

Por otra parte, en 1987, el Comité Internacional de Características Superficiales de la de la Asociación Internacional Permanente de

Congreso del Carreteras (AIPCR o PIARC), empezó a gestar las primeras ideas sobre la realización de un experimento que estableciese un cierto ordenamiento en las medidas de resistencia al deslizamiento, teniendo estos trabajos la finalidad de elaborar una escala universal de fricción, denominada Indice de Fricción Internacional (IFI), situación similar que tuvo anteriormente la regularidad superficial del pavimento, y que culminó con el nacimiento del concepto de Indice de Regularidad Internacional (I.R.I), que permite obtener en una misma escala valoraciones de las deformaciones u ondulaciones verticales de la superficie del camino (por lo que en algunos países se denomina rugosidad), con respecto a una superficie plana, independientemente de los diversos equipos de medición existentes.

Sin embargo, esta regularidad superficial no garantiza que la textura del pavimento sea la adecuada para poder tener una buena adherencia entre el neumático y el pavimento, ya que el IRI no toma en cuenta la microtextura y macrotextura de la superficie de rodamiento; en donde la primera se relaciona con la resistencia al deslizamiento (fricción) y la segunda contribuye a minimizar el fenómeno de hidroplaneo (separación del neumático con el pavimento, debido a una película de agua suficientemente gruesa), al drenar con mayor eficacia el agua de la superficie de rodamiento.

Es por ello que, como resultado de los congresos mundiales de carreteras de Bruselas y Montreal, el Comité Técnico Internacional de Características superficiales planificó y desarrolló un programa de trabajo encaminado a la armonización de las medidas de resistencia al deslizamiento, al que denominó: "Experimento Internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento".

El objetivo general del experimento era 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, el Indice de Fricción Internacional (IFI) y 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.

Cabe mencionar que el modelo IFI, propuesto por PIARC, es una modificación del *Penn State Model* (desarrollado por el Pennsylvania Transportation Institute, PTI) que relaciona la fricción con la velocidad

de deslizamiento (fiction-slip speed), y el Modelo *Horne,* que es un modelo mecanizado para predecir la resistencia al deslizamiento.

El IFI es un indicador nuevo (se presentó en el Congreso Mundial de la PIARC celebrado en Montreal en septiembre de 1995), por lo que su consideración ha tenido y tiene un largo comino para convertirse en una norma o recomendación de amplio uso internacional, es por ello que las administraciones de diferentes países están iniciando proyectos o estudios como esté para la implementación del *IFI* en la construcción de nuevas carretas y la consideración de sus parámetros en la administración de pavimentos.

Por esta razón, en el presente trabajo se expondrán los conceptos y los métodos para la comparación, armonización y aplicación de las mediciones de textura y resistencia al deslizamiento; hechas por el comité técnico en Caracterización Superficial de la Asociación Internacional Permanente de Congreso de Carreteras (AIPCR o PIARC), para la aplicación del Indice de Fricción Internacional (IFI),en la evaluación de las condiciones de la superficie de rodamiento, involucradas en la seguridad operacional de las carreteras mexicanas.

# I..II Situación Actual

El Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000 plantea que la infraestructura carretera básica deben ser adecuada, funcional, suficiente y autosustentable, debido a que estos factores condicionan la competitividad y la productividad de la economía, así como el desarrollo regional y la integración de los mercados que contribuyen a la riqueza nacional.

Debido a lo anterior, se tiene un interés particular tanto de las acciones de conservación, reconstrucción, modernización y ampliación de la red básica nacional (Tabla 5.1 y Figura 5.1); como de la integración de los 10 ejes troncales principales, mediante la evaluación estructural del pavimento, incluyendo el diagnóstico de las características de la superficie de rodamiento.

***Tabla 1.1.*** *Red básica nacional*

| Carretera NACIONAL | Km |
|---|---|
| Federal libre | 21,832 |
| Concesionada | 4,263 |
| CAPUFE | 1,420 |
| Total | 27,515 |

Dentro de estas características se encuentran: la textura, la fricción y la regularidad superficial, entre otras. En México, el único indicador internacional (***IRI***) considerado para evaluar estas características en las

carreteras, es el Indice de Regularidad Internacional(IRI), de reciente introducción.

En cuanto a la fricción, sólo se cuenta con los valores establecidos en el manual de proyecto geométrico de carreteras, desde 1977, y no se tiene una especificación mexicana para su evaluación. Cabe mencionar que en el caso de pavimentos para aeropuertos, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) es la única institución de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) que contempla, en su normativa, procedimientos aplicables para la medición y conservación de las características de rozamiento en sus pistas y plataformas.

En el caso de la textura, el manual mexicano de proyecto geométrico no considera el efecto de la textura, macrotextura en especial en la operación de sus carreteras, ni algún método para evaluar dicho parámetro.

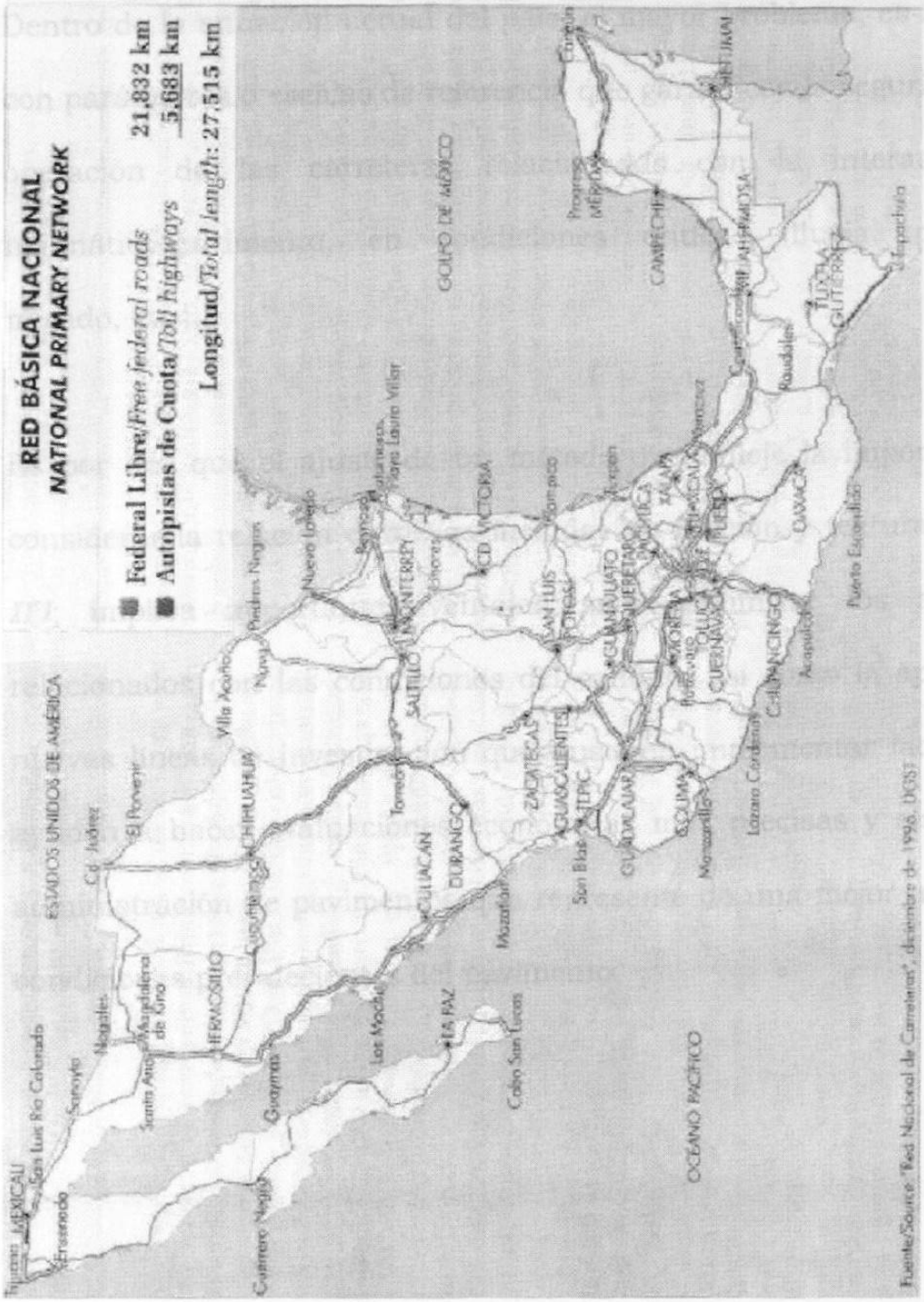



**Figura 1.2.** Distribución de la red básica de carreteras mexicanas.

# I.III El Problema

Dentro de la situación actual del país, el mayor problema, es no contar con parámetros o escalas de referencia que garanticen la seguridad en la operación de las carreteras relacionadas con la interacción del neumático–pavimento, en condiciones criticas (lluvia, pavimento mojado, etc.).

Es por ello que el ajuste de un método que refleje la importancia de considerar la relación entre las medidas de fricción y textura, como el ***IFI***; implica importantes ventajas para minimizar los accidentes relacionados con las condiciones del camino, así como la apertura de nuevas líneas de investigación que busquen implementar factores que ayuden a hacer evaluaciones económicas más precisas y sistemas de administración de pavimentos que represente de una mejor manera las condiciones prevalecientes del pavimento.

## I.IV Importancia e Implicaciones

El crecimiento económico de un país o comunidad está condicionado por la existencia de redes carreteras bien construidas y conservadas. Gracias a ellas son posibles los desplazamientos rápidos, seguros y baratos de las personas, los bienes y los servicios que, de una u otra forma, contribuyen a la riqueza nacional.

Las autoridades políticas comprenden que un ***sistema eficiente de carreteras es imprescindible para el desarrollo económico*** del país en su conjunto; por esta razón la construcción, rehabilitación y conservación de las carreteras, tendrá como uno de sus objetivos, proporcionar a los usuarios una infraestructura vial capaz de soportar, tanto las necesidades de movimiento de vehículos que se demandan en la actualidad, como también la que se genere en el futuro, de forma segura y funcional. Lo anterior, a través de buenos diseños de pavimentos, tanto estructurales como en su superficie de rodamiento.

Existe un gran interés por estudiar los factores que contribuyen a la generación de accidentes viales y la forma de poder evaluar, simular y cuantificar dichos factores a través de parámetros que garanticen la seguridad en las carreteras, lo cual es uno de los objetivos principales de la Ingeniería de Tránsito.

Las características superficiales de los pavimentos son las relacionadas con las capas de rodamiento que influyen en la funcionalidad de las carreteras. Por lo tanto, al tomar en cuanta los parámetros de fricción y textura (parte de las características superficiales) que definen el Indice de Fricción Internacional (IFI), no sólo se espera armonizar los diferentes métodos y equipos que miden sus parámetros; sino también obtener una serie de beneficios técnicos y económicos para cada sector interesado en las carreteras o los aeropuertos y, por consiguiente, para sus propios usuarios.

Esta tesis forma parte de una serie de investigaciones realizadas por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), para proponer recomendaciones o especificaciones que se incluyan en la Normativa del Sector Comunicaciones y Transporte; para la medición, interpretación y evaluación de los parámetros de fricción (acorde con lo ya establecido), textura y resistencia al derrapamiento de los pavimentos. Además, no debemos esperar a que ocurra una serie de accidentes en un mismo sitio, para evaluar el desempeño geométrico y superficial de la carretera.

# I.V OBJETIVOS

## *I.V.I Objetivo General*

Plantear las consideraciones que se deben tomar para la aplicación del Indice de Fricción Internacional, en la seguridad de carreteras mexicanas.

## *I.V.II Objetivos Específicos:*

- Recopilar información bibliográfica sobre los estudios realizados, internacionalmente, sobre el Índice de Fricción Internacional.
- Tomar en consideración lo estipulado en el los manuales de proyecto geométrico más utilizados para el diseño de carreteras mexicanas.

- Encontrar los valores prevalecientes de la fricción y la macrotextura, con un equipo, a cierta velocidad, en los tramos carreteros en estudio.
- Determinar el número de accidentes asociados con las condiciones superficiales del pavimento, en especial en condiciones de camino mojado.
- Determinar el efecto que tiene el IFI en la seguridad carretera del país.
- Hacer las consideraciones necesarias para la aplicación del IFI en la seguridad de las carreteras.

# I.VI HIPOTESIS

*Si se da el caso de que* los parámetros de fricción y textura que definen el Índice de Fricción Internacional (IFI) sirven para normar cualquier aplicación relativa a la resistencia al deslizamiento (estudios de accidentes, inspección para la gestión de la conservación de carreteras, etc.), y lo establecido en los manuales de proyecto geométrico mas utilizados en México para el diseño de carreteras. *Consideraremos* que:

"Debido a la influencia que tiene *la fricción y la macrotextura del pavimento* en la seguridad de carreteras, se recomienda entonces, considerar el método PIARC para calcular el Indice de Fricción Internacional, en la normativa mexicana correspondiente, para la evaluación de las auscultaciones de la superficie de rodamiento en las carreteras nacionales".

# CAPÍTULO II

# ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BASICOS

# II.I Características superficiales de los pavimentos y su Influencia en la interacción vehículo-carretera

Las características superficiales de los pavimentos son las relacionadas con las capas de rodamiento que influyen en la funcionalidad de las carreteras. Estas características interesan al usuario de la infraestructura carretera, ya que de ellas depende su seguridad, la comodidad de su circulación, sus tiempos de recorrido y los costos de operación.

Las características de los pavimentos se pueden clasificar por las dimensiones de las irregularidades superficiales, dependiendo de su tamaño (longitud de onda y amplitud de la irregularidad) y si las características son atributos globales o localizados.

La determinación de que un atributo sea global o local es importante, en términos de su medida. Los atributos globales, por pequeños que sean, normalmente se pueden medir confiablemente, usando procedimientos estadísticos aplicados sobre el área global. Los atributos locales se miden fácilmente, si se extienden sobre un área relativamente grande. Los pequeños atributos localizados son los más difíciles de medir.

Algunas de las características superficiales que se consideran importantes en la evaluación de las auscultaciones de pavimentos son:

- La Textura
- La Fricción
- La Regularidad superficial y el perfil longitudinal
- El Perfil transversal, incluyendo el peralte y las roderas
- El Trazado de la carretera (geometría), incluyendo las pendiente y el radio de curvatura
- Las Fisuras

Así como las propiedades reflexivas y de color, el drenaje superficial y la permeabilidad, el ruido de contacto neumático-pavimento, etc. Estas características influyen sobre los diversos aspectos relacionados con la funcionalidad de las carreteras. Los factores más notables son:

- La Seguridad
- El Confort
- Los Costos de operación
- La Dinámica de los vehículos

A continuación se aportará una explicación de las características de los más importantes parámetros, relacionados con esta investigación.

## II.I.I. Textura

La *Textura* del pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y la seguridad de los usuarios; necesario para la conservación de las carreteras. La textura influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase neumático-pavimento, evitando el fenómeno de hidroplaneo y, de forma indirecta, en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, de gran importancia para la adecuada adherencia entre neumático y pavimento.

Además, la *textura* es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico. En el aspecto económico, la textura del pavimento influye en el consumo de gasolina y en el deterioro de los vehículos.

Ahora bien, para su medición, la textura es la geometría mas "fina" del perfil longitudinal de la carretera, que se define como la desviación de la superficie del firme, respecto a una superficie planar menor o igual que 0.5 metros. Estudios realizados han demostrado que, para interpretar mejor los fenómenos que suceden en el contacto neumático–pavimento, asociados a situaciones de riesgo durante las operaciones de frenado en pavimento mojado, es conveniente subdividir la textura en tres clases: Megatextura, Macrotextura y Microtextura.

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 (Tabla 2.1) de las características geométricas y superficiales basadas en longitudes de onda y en amplitudes de las irregularidades

***Tabla 2.1***

*Irregularidades de un pavimento (Flexible o Rígido)*

| Nombre | | Rango de Dimensiones (aprox.) | |
|---|---|---|---|
| | | Horizontal ( λ ) | Vertical |
| Microtextura (Fricción) | | 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 | 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 |

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.

En la Figura 2.1 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.

### *Microtextura:*

La microtextura comprende la longitud de onda mas pequeña y está en 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 (Figura 2.2). Es importante para la adherencia entre el neumático y el pavimento y, por tanto, para la resistencia al derrapamiento, por lo que la microtextura influye en el riesgo de *accidentes,* independientemente de la velocidad de operación. En todo caso, las irregularidades de este tipo están presentes y en ciertas condiciones es necesaria su existencia.

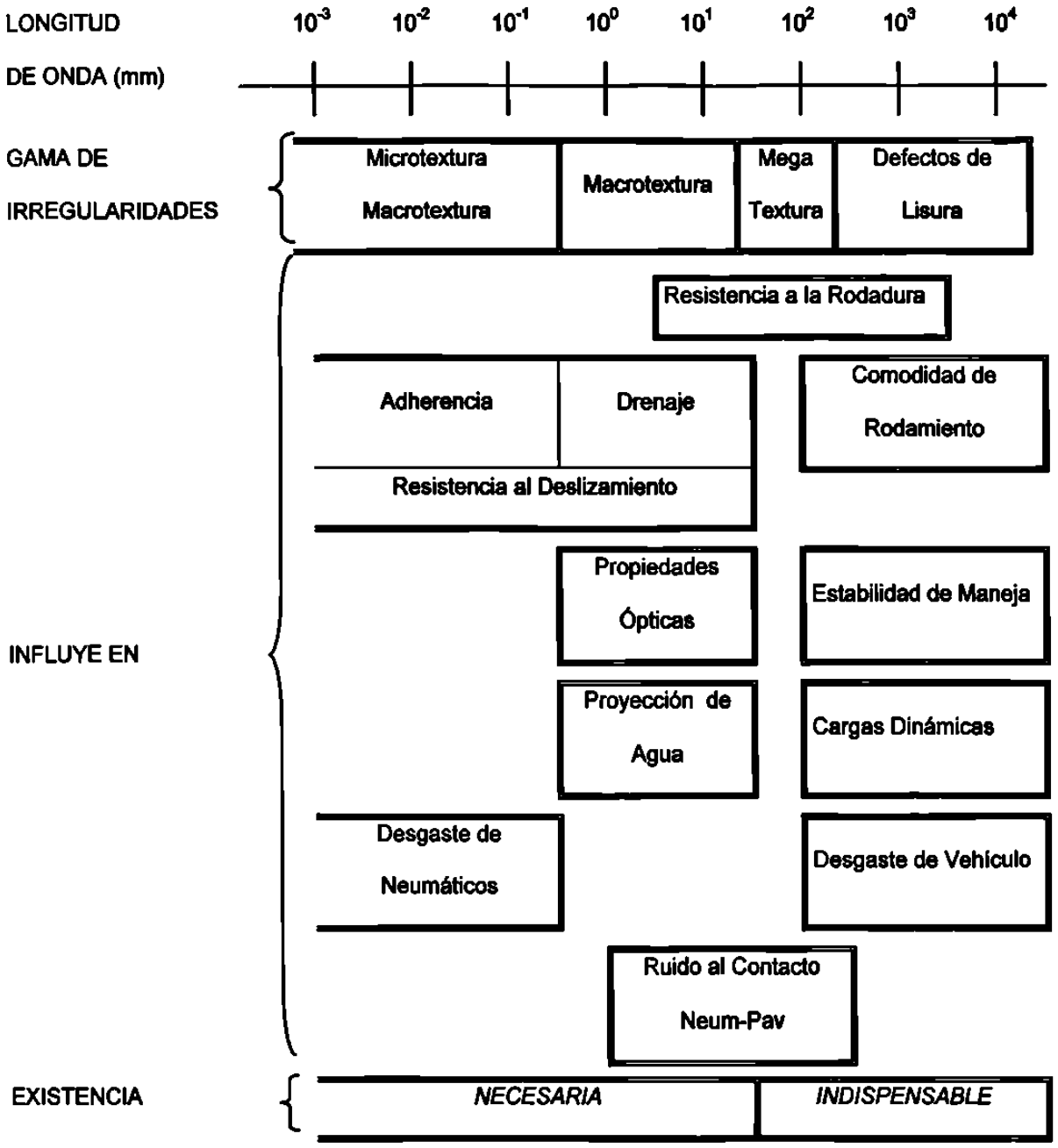



***Figura 2.1.*** *Influencia de las irregularidades superficiales en los fenómenos de interacción entre el vehículo-carretera.*

Así por ejemplo, un árido determinado, ubicado en la superficie de rodamiento, que tenga un alto grado de pulimento [illegible], producirá valores bajos de microtextura, ya que, ésta se considera particularmente importante en la valoración de la resistencia al deslizamiento (fricción) de la superficie. Una forma indirecta de medir la microtextura consiste en determinar el coeficiente de fricción o rozamiento.

### *Macrotextura:*

La macrotextura incluye longitudes de onda mayores, desde el tamaño del árido, hasta la huella del neumático, define el relieve de la capa de rodamiento y depende de la composición de la mezcla, del riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficie dado a la capa de concreto (estriado, engrillado, etc.). Degradaciones tales como la pérdida de gravilla, las grietas y la existencia de juntas, sólo contribuyen en casos poco frecuentes o si hay escalonamiento notable. En la Figura 2.2 se puede observar gráficamente la diferencia entre la microtextura y la macrotextura de un pavimento.

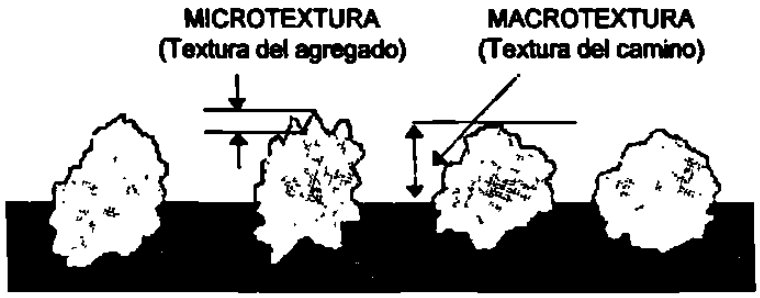



***Figura 2.2.*** *Microtextura y Macrotextura*

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento, a velocidad media y elevada (mas de 60 kph) con pavimento mojado. Además del rozamiento por deformación relacionado con la histéresis elástica del caucho, la rugosidad permite restablecer el contacto con 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 (Figura 2.3).

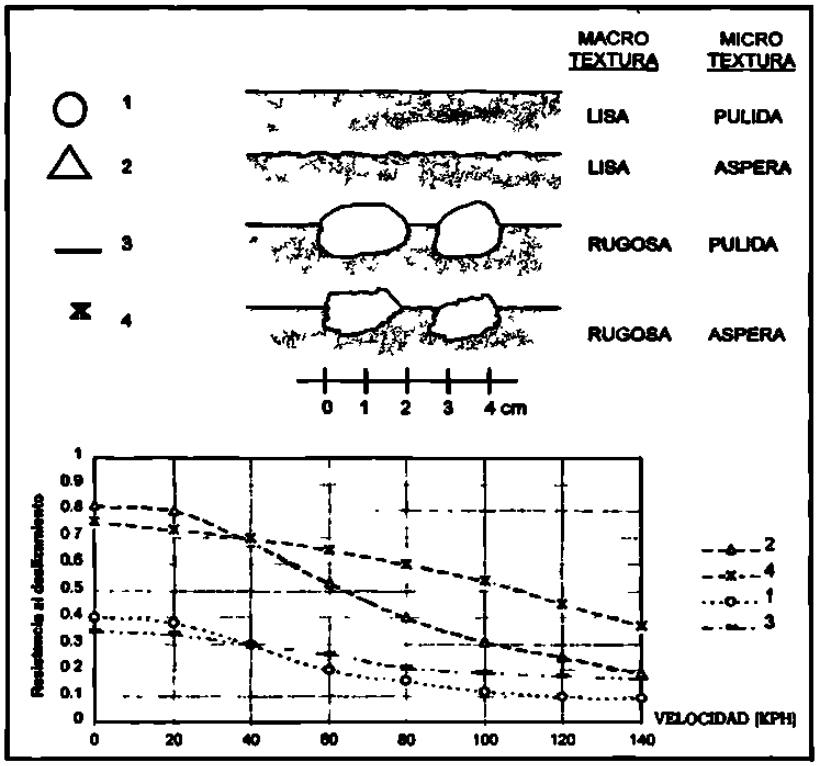



***Figura 2.3*** *Influencia de la Textura y la Velocidad en el coeficiente de resistencia al Deslizamiento*

La Macrotextura tiene una pequeña influencia en el consumo de combustible, al aumentar la resistencia al rodamiento; 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. Un drenaje más eficaz permite también una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redunda en una mejora en la seguridad de operación, al evitarse el *hidroplaneo.*

El ***hidroplaneo*** se puede resaltar como una de las características de las carreteras que pueden afectar al usuario. El *hidroplaneo* (o *aquaplaning*)

ocurre cuando una película de agua (Figura 5.4) separa la rueda de la superficie de la carretera. Este fenómeno está asociado fundamentalmente, con la velocidad y peso del vehículo, las características de los neumáticos y la textura y el espesor del agua en el pavimento.

Puesto que el hidroplaneo solamente puede ocurrir cuando hay agua en el pavimento, el riesgo de hidroplaneo de cada tramo de carretera se determina considerando la topografía del pavimento, su geometría superficial, su textura y su peralte, que determina la película de agua.

Hay dos tipos de macrotextura:

- *La Positiva*, que es típicamente la que se obtiene a través de los tratamientos superficiales, como el riegos de sello.
- *La Negativa*, que se refiere a las mezclas porosas o que tienen la capacidad de drenar el agua que escurre longitudinal y transversalmente hacia el arcén (drenaje por escorrentía).

Ambas ofrecen, en diferente grado, las ventajas mencionadas. En cambio, son muy diferentes en lo referente al ruido. Mientras que con macrotextura positiva aumenta el ruido en todas las frecuencias, las mezclas porosas (macrotextura negativas) llegan a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no sólo en el contacto neumático-

pavimento, sino también, el producido por el motor, por absorción acústica.

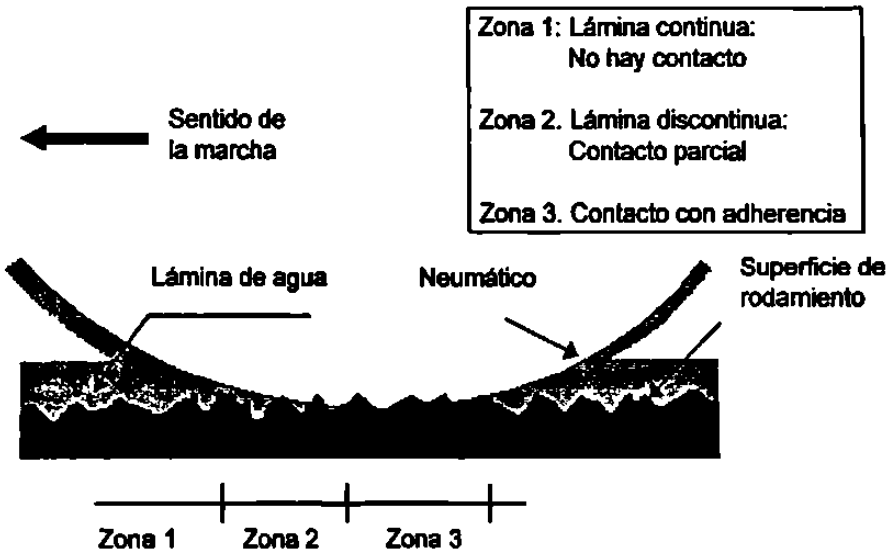



***Figura 2.4*** *Condición de contacto entre la rueda en movimiento y una superficie mojada.*

## *Megatextura:*

La Megatextura está constituida por irregularidades de tipo intermedio, relacionadas con la textura final y recientemente con la regularidad superficial así como 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

más 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

## *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 tráfico o a deformaciones en el terreno de cimentación. Estas irregularidades afectan la comodidad del usuario, por las vibraciones que se producen, el desgaste de los vehículos, la mercancía transportada, así como el aumento del consumo de combustible y 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 maniobrabilidad 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.

## II.I.II Fricción o Resistencia al deslizamiento

Esta característica del pavimento también es un valor crítico en la seguridad, cuando el pavimento está mojado. Su medida y estudio es fundamental en carreteras de alta velocidad y/o elevada intensidad de tráfico (carreteras de altas especificaciones). La fricción se determina de forma indirecta, midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una rueda de goma "estandarizada".

El coeficiente de rozamiento (o fricción) es el parámetro que se emplea para determinar el nivel de adherencia entre el neumático y el pavimento. El valor del coeficiente de rozamiento depende de una serie de factores, algunos inherentes a la carretera, mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de los neumáticos del vehículo) o de la meteorología (lluvia, nieve o hielo sobre la calzada, etc.). la demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es función del tipo y del estado del pavimento.

Al igual que otras características superficiales, los niveles de adherencia de un pavimento evolucionan con el tiempo, como consecuencia del pulido de la superficie por la acción repetida de los

neumáticos de los vehículos. Por tanto, se tiene que comprobar el coeficiente de rozamiento (fricción) mediante técnicas de auscultación

Existe una gran variedad de equipos y de principios de medición, lo que dificulta la interpretación y la comparación de los datos. Para solucionar este inconveniente la PIARC realizó un experimento para establecer correlaciones y comparaciones entre los equipos.

# II.II Medida de la Adherencia Neumático–Pavimento

La adherencia neumático-pavimento es un factor fundamental que interviene en la seguridad de la circulación sobre los pavimentos flexibles o rígidos, ya que permite reducir la distancia de frenado y mantener, en todo momento, la trayectoria del vehículo aún 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 con 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).

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.

Cabe mencionar, que existe una marcada diferencia en la resistencia al deslizamiento (derrapamiento) en todos los tipos de pavimentos para carreteras. Para el caso de un pavimento seco en buen estado, el coeficiente de resistencia al derrapamiento no experimenta una pérdida sensible con el incremento de la velocidad. De la misma manera no existen diferencias apreciables para el caso de utilizar neumáticos nuevos o desgastados en superficies secas. Si el pavimento está mojado, esta situación cambia totalmente, apreciándose una fuerte disminución en la resistencia al derrapamiento con la velocidad.

Esta pérdida de resistencia al derrapamiento, aun mayor cuanto más gruesa es la película de agua, hace que la conducción sea más peligrosa por la falta de adherencia al pavimento, y por consiguiente, en la necesidad de tener mayor distancia de frenado, por lo que se requiere mayor atención a los tramos carreteros o autopistas que tengan

precipitaciones frecuentes y velocidades de operación altas, así como con fuertes volúmenes de tránsito vehicular

Está comprobado que las necesidades de adherencia y de capacidad de evacuación del agua en los "huecos" del neumático y del pavimento se pueden asegurar razonablemente con pavimentos que tengan determinados valores de microtextura y de macrotextura. Es decir, la Microtextura influye en la fricción y la Macrotextura en la capacidad de evacuar agua rápidamente, lo cual influye en el riesgo de accidentes por derrapamiento a cualquier velocidad, así como en el desgaste de los neumáticos de los vehículos que circulan por la superficie de rodamiento y, por ende, su influencia en los costos de operación.

Por otra parte, 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.

# II.III Equipos de Medición.

- ***El Método del Círculo de Arena(Norma española: NLT-335/92)***

El método del círculo de arena sirve para determinar medidas puntuales de la macrotextura (rugosa o lisa), consiste en extender sobre la superficie de un pavimento un volumen determinado ($50cm^3$) de arena fina uniforme, de manera que cubra todas las irregularidades de la superficie, quedando enrasada la arena con los picos más salientes. Se procura extender la arena en forma de círculo, con lo que es fácil determinar el área cubierta por la arena.

Para pavimentos de concreto hidráulico la profundidad media de la textura superficial determinada por el método del círculo de arena debe estar comprendida entre 0.7 y 1 mm. Mientras que para la recepción de capas de rodamiento con material asfáltico, la textura no debe ser inferior que 0.7mm.

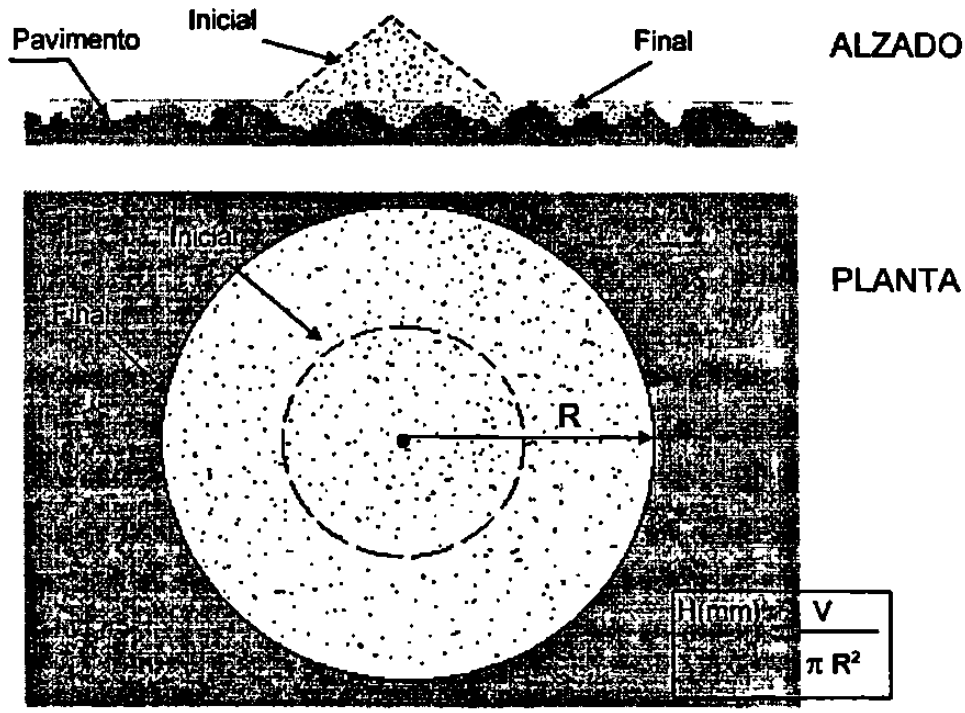



***Figura 2.5*** *Esquema del ensayo del círculo de arena.*

- ***El Péndulo de Fricción.***

  ***(ASTM E-303/83 ó NLT-175/92)***

El péndulo de fricción da una indicación indirecta del grado de rugosidad que proporciona la microtextura del pavimento.

El péndulo de fricción se utiliza en dos formas:

- En el ensayo para la determinación del coeficiente de pulimiento acelerado de los agregados, empleando una zapata de goma de

tamaño reducido, sobre la superficie de las probetas diseñadas con los agregados a ensayar.

- Directamente sobre la superficie de la carretera empleando una zapata de mayor tamaño que la anterior, sobre la superficie mojada del pavimento.

El péndulo de fricción y el método del cono de arena no son muy utilizados para determinar el estado de una red de carretera, ya que presentan limitaciones de uso por su lentitud, por interferir en el tránsito y por su pequeña representatividad espacial.

***Figura 2.6.*** *Péndulo británico TRRL.*

## ◻ *Perfilómetro Láser.*

La determinación del perfil a la escala de la macrotextura suele hacerse con perfilómetros láser, que emite un rayo sobre un punto del pavimento mediante un receptor, situado en ángulo respecto al láser, determinan la altura de dicho punto. El láser puede ir instalado en equipos estacionarios sobre una viga por la que se desplaza el emisor o montado en un vehículo que se desplaza a velocidad de hasta 70 km/hr, con el objeto de automatizar las mediciones y no interferir con el flujo vehicular, principalmente en autopistas.

## ◻ *El Sideway Coefficient Routine Inventory Machine "SCRIM" (NLT-336/92).*

Para medir directamente la fricción, se tiende cada vez más a utilizar equipos acoplados a un vehículo o remolcados. Entre éstos existen diferentes tipos, según las características de la rueda de medida:

- Rueda oblicua (respecto al sentido de la marcha).
- Rueda bloqueada.
- Rueda parcialmente bloqueada, con grado de deslizamiento fijo.

- Rueda parcialmente bloqueada, con grado de deslizamiento variable.

Los equipos de rueda oblicua determinan el coeficiente de rozamiento transversal. Uno de los equipos más utilizados de este tipo es el SCRIM (Sideway Coefficient Routine Inventory Machine). La velocidad relativa de la rueda de estos equipos respecto al pavimento es proporcional a la velocidad del vehículo, multiplicada por el seno del ángulo de deriva, 20° en el caso del SCRIM.

Los equipos de rueda bloqueada pueden medir el coeficiente de rozamiento a gran velocidad, pero no sirven para la auscultación continua de los pavimentos de la red, pues el neumático de ensayo se desgasta muy rápidamente y, por ello se reserva para ensayes puntuales, como por ejemplo, en los pavimentos de aeropuertos.

Los equipos de rueda parcialmente bloqueada suelen operar con un deslizamiento comprendido entre el 10% y el 20%. Estos equipos son sensibles principalmente a la microtextura.

Otro aspecto por el que se diferencian los equipos de medida de la fricción es por el tipo de neumático de la rueda de medida (diagonal o radial; estríado o con dibujos).

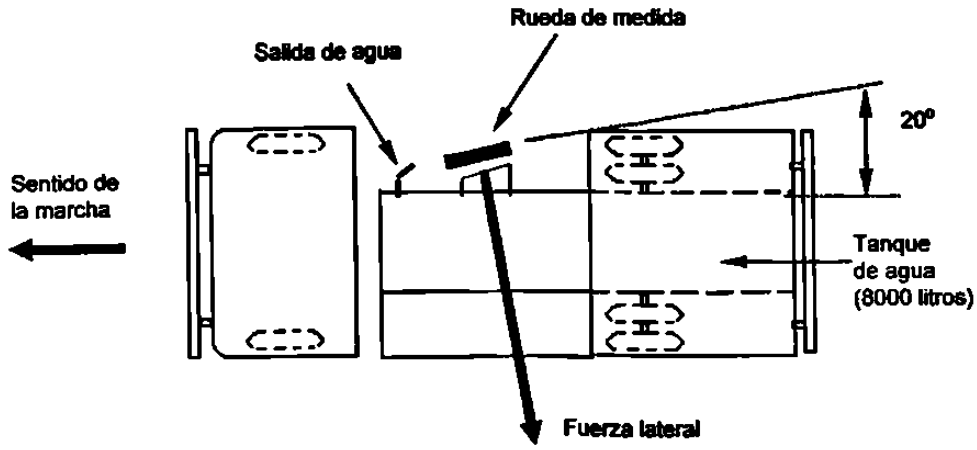



***Figura 2.7*** *Esquema del equipo SCRIM.*

- ***El Mu-Meter.(ASTM E-274/90)***

El Mu-meter es utilizado principalmente en aeropuertos, para determinar el coeficiente de fricción de las pistas, las zonas de rodaje y las plataformas, tanto en pavimentos secos como en pavimentos húmedos.

Los coeficientes obtenidos con los diversos procedimientos y equipos de medida de la resistencia al deslizamiento presentan diferencias, incluso con aparatos del mismo tipo, debido a las numerosas variables que intervienen. Un factor importante es la velocidad a que se realiza la

medida, ya que prácticamente no puede interpretarse el coeficiente de resistencia al deslizamiento sin conocer la velocidad. Sin embargo, existe una correlación de cada equipo entre lo que mide y el estado del pavimento.

# CAPÍTULO III

# EXPERIMENTO DE ARMONIZACIÓN

# III.I Antecedentes y Consideraciones

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 la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (PIARC) propuso un experimento internacional de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento, el cual se efectuó en carreteras en servicio de Bélgica y España en 1992. Los tramos seleccionados presentaron una variedad de pavimentos, asfálticos y de concreto hidráulico, cubriendo una gama de valores 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 deriva, 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 (Figura 2.4), se comprende que, para evaluar la capacidad de resistencia al deslizamiento, se puede proceder 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 a baja velocidad depende del número de puntos de contacto en seco entre el neumático y los áridos del pavimento que se producen tras la ruptura de la película de agua residual producida por la microtextura (tanto mayor cuanto más áspera es), por lo que al

aumentar la velocidad, disminuirá la fricción. Esta disminución es tanto menor cuanto mejor es la capacidad de evacuación del agua que proporciona la macrotextura (tanto mayor cuanto más gruesa sea).

Para efecto del experimento Internacional de Comparación y Armonización, los 38 equipos utilizados (ver Tabla A1, en el apéndice A) para evaluar los 54 tramos de prueba, se clasificaron según su sistema de medición (Tabla 3.1 )

***Tabla 3.1*** *Sistemas de los equipos de medición*

| **Fricción** | **Textura** |
|---|---|
| • Con Rueda Oblicua <<*Side Force*>> | • Equipos Estacionarios |
| • Con Rueda Parcialmente Bloqueada <<Fixed Slip>> (c/ Grado de Deslizamiento Fijo) (c/ Grado de Deslizamiento Variable) | • Equipos Móviles a velocidad de crucero |
| • Con Rueda Bloqueada <<*Locked Wheel*>> | • Equipos Móviles de gran velocidad |

Todas las mediciones de *textura,* fueron realizadas sobre superficies secas antes de que fuera mojado el pavimento para las pruebas de fricción. Los métodos para determinar la textura se refirieron a la profundidad media de la textura (MTD, como el circulo de arena) y el

método dinámico (móvil) con sistema de rayos láser que se proyectan a la superficie de rodamiento.

Los equipos de *fricción* fueron ensayados a tres velocidades 30, 60 y 90 km/hr; y en cada prueba se realizaron dos repeticiones, con cada velocidad. Si la velocidad normal de uso del equipo no era una de estas tres, se sustituía a la más próxima por la velocidad estándar. Debe tenerse en cuanta que, aun cuando cada sistema utilizado para medir la fricción tiene su propio arreglo y modo de ensaye, el rozamiento depende de la velocidad de deslizamiento (S) que está ligada con la velocidad del vehículo (V) y presenta la siguiente relación:

- La velocidad de deslizamiento (S) será igual a la velocidad del vehículo (V) cuando se tenga un sistema con rueda bloqueada

  $S = V$

- La velocidad de deslizamiento (S) será igual a la velocidad del vehículo (V) afectada por un tanto por ciento del deslizamiento, cuando se tenga un sistema con rueda parcialmente bloqueada

  *S = V (% deslizamiento)*

- La velocidad de deslizamiento (S) será igual a la componente de la velocidad del vehículo (V) cuando se tenga un sistema con rueda oblicua.

  *S = V(Seno del ángulo de oblicuidad)*

El modelo final utilizado en este experimento permite establecer la relación entre la fricción medida con un equipo cualquiera y la velocidad de deslizamiento, denominado "Modelo PIARC", permitiéndonos predecir la *resistencia al deslizamiento;* así como tener las herramientas necesarias para tener un sistema de armonización y definición de un Índice de Fricción Internacional (IFI)

El experimento de PIARC concluyó con la elaboración de una escala de referencia universal de fricción, denominada Índice de Fricción Internacional (IFI), basado en un modelo que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento. El IFI viene indicado por dos números expresados entre paréntesis, separados por una coma (F60, Vp), los cuales indican:

a) El estimado da la "**Ficción idealizada a 60 km/hr (F60)** " al cual se deriva de la medida de la fricción tomada en campo, cuyo número indica un valor adimensional, donde el valor cero de la fricción corresponde a una superficie perfectamente lisa y el valor uno, una alta rugosidad (la adherencia).

b) El segundo termino, denominado **"Constante de referencia de la velocidad (Vp) "** se deriva de la medida de la macrotextura que da una mejor idea de la superficie de rodamiento y la velocidad de

operación adecuada a esta textura; además, es un número positivo, sin límites determinados y con unidades de velocidad en km/hr.

El ***IFI,*** por lo tanto, se puede describir como una escala de referencia, de aplicación internacional, de la Fricción y la Textura en un pavimento .

# III.II. Modelos Matemáticos de Referencia

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

## *III.II.I Modelo de Pensilvania (Penn Model)*

El modelo de Pennsylvania (J. J. Henry 1992) asocia la fricción (F) a la prueba de deslizamiento desarrollada con una cierta velocidad de deslizamiento (S), proponiendo la ecuación siguiente:

$$F(S) = F_0 * e^{\frac{-S}{Vo}}$$

Donde:

**F(S)**, es el valor de la fricción idealizada a una velocidad de deslizamiento (slip speed) "s" dada.

**S**, es la velocidad de deslizamiento (slip speed de la llanta de prueba[*1]., en kph.

***V***, Es La velocidad del vehículo afectada por la condición de su llanta de prueba, ya sea:

- Con Llanta bloqueada
- Usando un % del deslizamiento para una llanta parcialmente bloqueada
- Usando el Seno del Angulo de Deslizamiento

***$F_0$ y $V_0$*** = Son característicos de un pavimento para un cierto equipo y además relativos a la textura.

En la Figura 3.1 se muestra una relación tipifica de Fricción, contra Velocidad de deslizamiento. En la figura se muestran los niveles (intervalos) de velocidad de deslizamiento, para los equipos que participaron en el experimento.

Estos son los intervalos apropiados de la velocidad de deslizamiento, correspondientes a las velocidades del vehículo que fluctuaron de 30 a 90 kph con el punto medio correspondiente a 60 kph. Para aplicar el modelo fue necesario:

1) Establecer la curva de fricción contra la velocidad de deslizamiento, para cada uno de los tramos de prueba, la cual es llamada *Curva Idealizada (Golden Curve).*

2) Establecer un modelo para todos los equipos, para que de esta manera se puedan predecir los valores de la Curva Idealizada *(Golden Curve Value).*

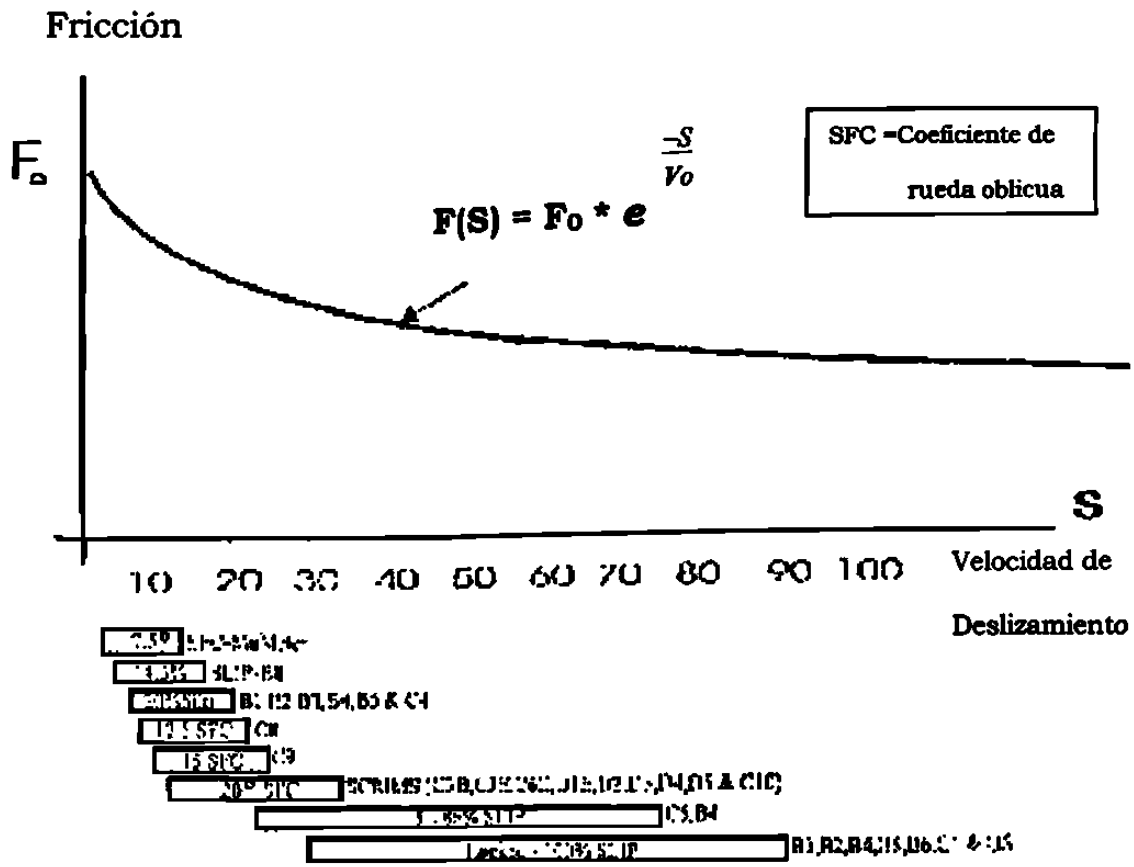



***Figura 3.1.*** *Intervalo de deslizamiento para varios equipos graficados en la curva de Fricción-Velocidad de deslizamiento (Mu-Slip speed) para la prueba con velocidades de 30 a 90 kph*

El modelo del estado de Pennsylvania fue al principio ligeramente modificado utilizando una constante F1 (nivel de fricción a 10 Km./h en lugar de 0 Km./h). Esta ecuación, modificada, da los mismos valores de F(S), pero tiene constantes diferentes. El modelo modificado es el siguiente.

$$F(S) = F1 * e^{\frac{10-S}{V_o}}$$

Donde:

$F_1$ es el valor de F(S) a 10 Km./h

## III.II.II Desarrollo de la Curva de referencia (Golden Values)

El pensamiento inicial para utilizar F1 en vez de $F_0$ (del Penn Model) era que muchos de los coeficientes de la rueda oblicua (SFC) y los equipos con llanta semibloqueada (SLP) pudiesen correlacionarse adecuadamente con F1. De cualquier modo, estas correlaciones sólo serían correctas, si se incluye una medición de textura para obtener buenos resultados. Posteriormente, se decidió utilizar una llanta lisa para trazar la *Curva Idealizada*, con el propósito de llegar a su estandarización y armonización, debido a la sensibilidad que tiene la velocidad de deslizamiento a 60 kph o más, con la macrotextura y microtextura.

Debido a que la curva de fricción – velocidad de deslizamiento es distinta para cada equipo, aún cuando se ensaye en el mismo pavimento, "la interpretación adecuada de los datos que arroje ésta estará restringida al equipo utilizado y a la experiencia que se tenga de éste para el manejo de sus datos".

Es por ello que, para mejorar esta situación y armonizar la medida de los equipos, se llevó a cabo el Experimento Internacional, estableciendo

con sus resultados el procedimiento que permite ajustar las curvas de cada equipo alrededor de una CURVA DE REFERENCIA IDEALIZADA "GF(S), GOLDEN VALUES", que representa la función Fricción-Velocidad de Deslizamiento "real o idealizada" de un pavimento.

Las curvas obtenidas (Figura 3.5)con este procedimiento 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" ("Golden Value"), cuya expresión es:

$$GF(S) = GF60 * e^{\frac{60-S}{GS}}$$ ..... Ecuación 3.1

donde:

GF(S) Es la fricción en la Curva de Referencia idealizada correspondiente a una velocidad de deslizamiento (S)

GF60 Es el valor de la fricción en la Curva de Referencia, a una velocidad de deslizamiento de 60km/hr.

S Es la velocidad de deslizamiento (Slip) del equipo durante el ensayo.

GS Es la constante que representa la influencia de la velocidad en la Curva de Referencia.

## *III.II.III Modelo de la PIARC*

El modelo PIARC relaciona la fricción de un pavimento con la *velocidad de deslizamiento* de un vehículo, sobre la superficie de rodamiento. El modelo es de tipo exponencial y se describe en función de una constante "$FR_{60}$", referida a la velocidad de deslizamiento a 60kph. Esto permite convertir la medida de fricción realizada a cualquier velocidad (***$FR_S$***), a una medida de fricción de 60kph (***$FR_{60}$***), a partir de una constante de referencia de la velocidad (***Vp***).

Como ya se dijo anteriormente, por definición, la pareja de valores indicados por **(F60, Vp)** se designa como el Indice de Fricción Internacional (**IFI**) de un pavimento, su conocimiento permite dibujar la *curva de referencia estimada* de Fricción- velocidad de deslizamiento, que representa la condiciones prevaleciente del pavimento.

La Figura 2 representa de forma esquemática el modelo PIARC que describe la curva de "Fricción - velocidad de deslizamiento" de un equipo determinado.

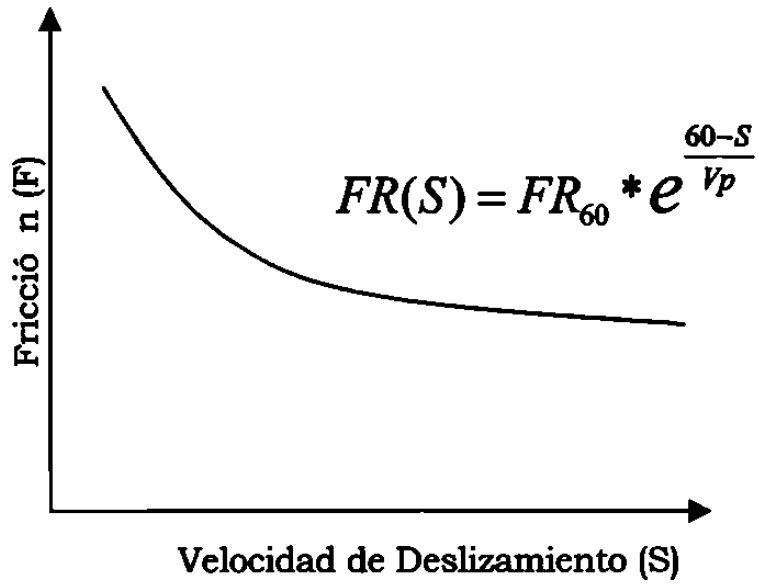



***Figura 3.2.*** *Curva de Fricción – Velocidad de deslizamiento ( Modelo PIARC )*

A continuación se presenta el procedimiento del modelo PIARC para la determinación del Indice de fricción Internacional y su curva idealizada de Fricción - Velocidad de deslizamiento:

1. *Primero se determina el valor de la constante de referencia de velocidad* ***Vp****, basándose en el valor de las medidas de la Macrotextura (****Tx****) obtenida en campo.*

Cabe señalar que durante la elaboración del modelo, y a partir de los datos del experimento, se ha comprobado que la constante **Vp** de la velocidad de referencia se podía determinar mediante una regresión lineal, en función de la medida de la *Macrotextura (Tx)* tal que:

$$Vp = a + (b * TX) \quad \text{..... Ecuación 3.2}$$

Donde los valores de:

**a** y **b** son constantes según el equipo de medición de textura. Para el Círculo de Arena (Fig.3.A8SP)

a= -11.59

b= 113.63

**TX** es el valor de la Macrotextura obtenido en campo.

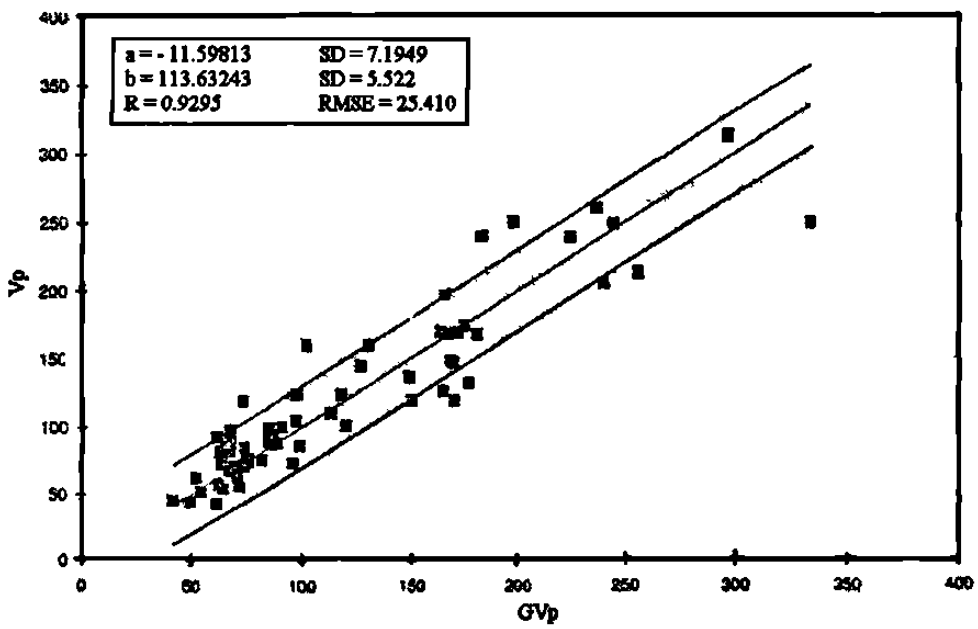



***Figura 3.3.A8SP.*** *Valores de las constantes **a** y **b** con base en la correlación de Vp (con un equipo A8) con GVp usando el modelo PIARC Vp = a (b*Tx).*

2. *Determinación del Valor de* $FR_{60}$.

a) Se mide el valor de la fricción ($FR_S$) en el campo, con alguno de los equipos establecidos, a una velocidad de deslizamiento (S) dada.

b) Dependiendo del equipo, la velocidad de deslizamiento (**S**) estará *afectada por* la condición de la llanta de prueba, tal que:

i) S = *V*elocidad del Vehículo (*V*) durante el ensayo

para equipos con Rueda Bloqueada

ii) S = *V*elocidad del Vehículo (*V*) *(% de Deslizamiento)

para equipos con Rueda Parcialmente Bloqueada

iii) S = *V*. del Vehículo * Sen ($\alpha$ =Angulo de deslizamiento)

para equipos. con Rueda Oblicua

c) Se determina el valor de la constante "$FR_{60}$", a partir del valor de la fricción ($FR_S$), la velocidad de deslizamiento (S) y la constante Vp, mediante la expresión:

$$FR_{60} = FR_S * e^{\frac{S-60}{Vp}}$$ ..... Ecuación 3.3

3. *Obtención del valor idealizado de la fricción ( **F60** ) con la ecuación:*

$$F60 = A + (B*FR_{60}) \text{ ..... Ecuación 3.4}$$

Donde los valores de:

**A** y **B** son constantes armonización, según el equipo utilizado para medir la Fricción. En el caso del Péndulo de Fricción Británico (Fig.4.A14).

A= 0.078

B= 0.0071

**$FR_{60}$** es el valor obtenido en la ecuación anterior

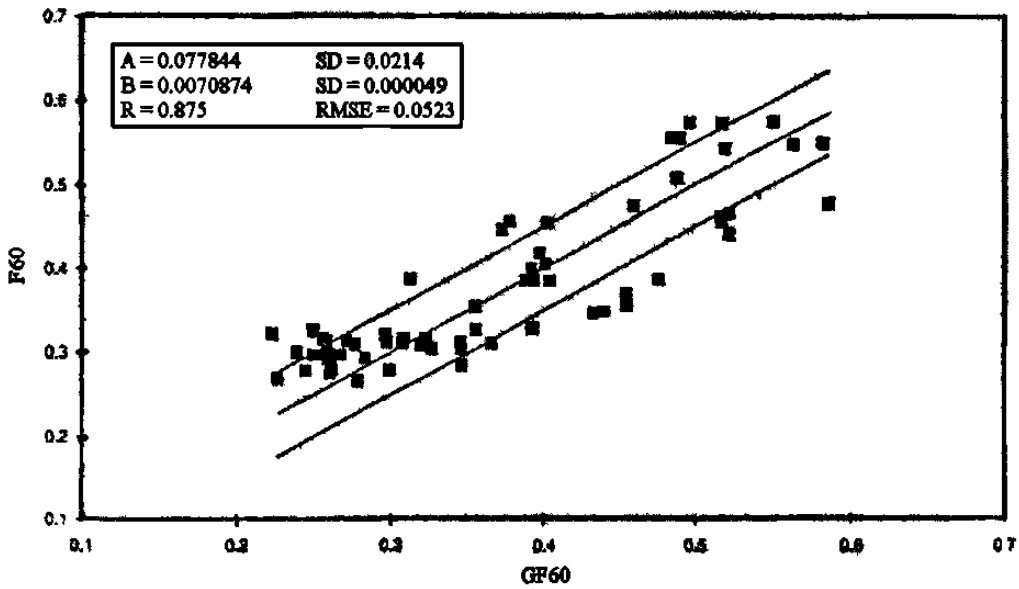



***Figura 3.4.A14.*** *Valores de las constantes A y B, basándose en la correlación de F60 (con equipo A14 como medida de microtextura) con GF60 usando el modelo PIARC y donde Vp se determino usando MTD*

# III.III Notación del IFI(F60, Vp) Según el PIARC

La notación IFI, es el resultado del experimento PIARC por comparar y armonizar los diferentes sistemas de medición y evaluación de la textura y la velocidad d deslizamiento (fricción).

El proceso de armonización permite establecer para cada equipo la fricción de referencia estimada, ***F60***, que presumiblemente estará cerca del valor de "referencia o idealizado de GF60".

Una vez calculados los parámetros idealizados (o estimados) de referencia "*F60*" y " *Vp*" se recomienda elaborar la gráfica de "*Fricción - Velocidad de deslizamiento*" mediante la Ecuación 3.4 y los puntos auscultados para concluir con el proceso.

$$F(S) = F60 * e^{\frac{60-S}{Vp}}$$ ..... Ecuación 3.5

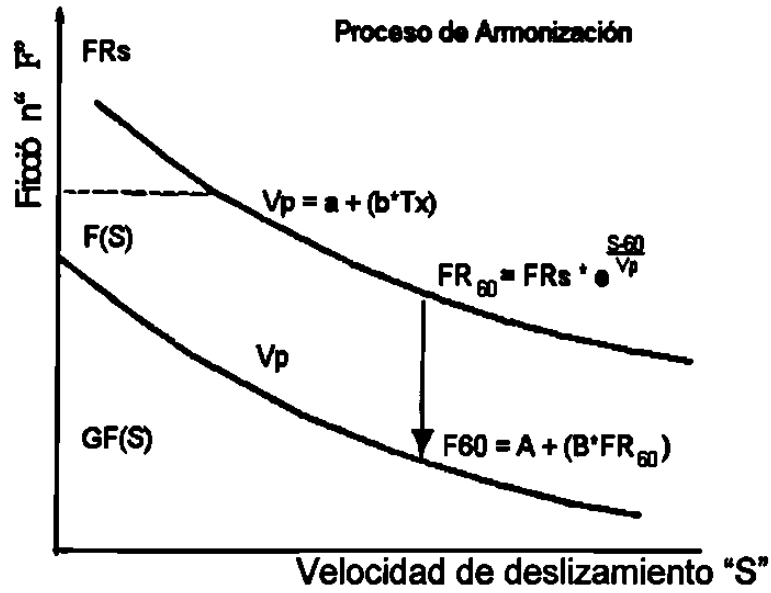



***Figura 3.5.*** *Curva de Fricción – Velocidad de deslizamiento (Proceso de Armonización)*

En la **Figura 3.5** se observa como una curva de fricción ($FR_{60}$), de un equipo en particular, se ajusta o armoniza a la ideal de referencia "F60", utilizando los coeficientes de armonización (a, b y A, B) generados en el experimento PIARC.

La ventaja de este método es poder inferir cualquier valor obtenido en campo a un estándar de fricción y de ahí finalmente uno ideal de

referencia que representa las características prevalecientes de fricción y textura, independientemente del equipo utilizado para su medición. Dicha armonización será válida siempre y cuando el proceso haya sido correcto y adecuado.

# III.IV Correlación Entre los Distintos Equipos de Medición

## *III.IV.I Diferencia y Semejanzas con otros Indices*[1]

Actualmente, las administraciones de carreteras y aeropuertos utilizan una serie de índices muy diversos asociados y exclusivos, al equipo de medición empleado. Uno de los más conocidos es el ***CRT*** (Coeficiente de Rozamiento Transversal), obtenido por el equipo SCRIM (Sideway Coefficient Routine Inventory Machine) de origen británico y el ***SN*** (Skid Number = $f$ * 100) que es usado ampliamente en Estados Unidos de Norteamérica.

Estos índices representan el valor de la fricción en un pavimento, con una prueba al deslizamiento en determinadas condiciones. Por tanto *no es posible* establecer directamente la equivalencia entre un valor ***SN*** y un valor ***CRT***, debido a sus diferentes sistemas de medición, uno es de rueda bloqueada (como el Péndulo británico) y el otro de llanta oblicua (SCRIM) respectivamente.

En cambio, cuando se determina el valor de IFI, se tiene una idea muy aproximada de las características de fricción para diferentes pavimentos, medidos en circunstancias diversas y con equipos distintos.

Cabe señalar, que el *IFI* integra, de forma separada, las dos medidas de *Textura* (la Microtextura y la Macrotextura) necesarias para tener una idea clara de la capacidad de un pavimento para ofrecer una superficie *segura* en condiciones adversas.

### *III.IV.II Relación entre diferentes condiciones de prueba en la medición de fricción.*

De acuerdo con los estudios de repetibilidad de los equipos para medir la fricción, las tres velocidades de deslizamiento empleadas y distintos niveles de fricción, se ha observado que no existe un comportamiento generalizado con respecto al efecto de la velocidad, ya que algunos equipos utilizados por PIARC se comportan mejor a velocidades altas y otros a velocidades bajas. Además, muchos equipos no muestran tendencias claras respecto a la velocidad.

El resultado del promedio de las correlaciones del *Péndulo* (que dan una idea de la microtextura) con otros ensayos ha sido de sólo 0.689, que no es un valor alto, si consideramos los demás resultados (Tabla 3.2).

En general, la correlación existente entre los distintos equipos utilizados para medir la fricción, ha sido aceptable, de acuerdo con los valores obtenidos en las mediciones hechas por PIARC, tal como se muestra en la tabla siguiente:

***Tabla. 3.2***

*Correlación simple entre equipos*

| TIPO DE EQUIPO (Fricción) | Rueda Oblicua | Rueda Parcialmente Bloqueada | Rueda Bloqueada | Péndulo |
|---|---|---|---|---|
| Rueda Oblicua (*Side Force*) | 0.863 | 0.819 | 0.795 | 0.665 |
| Rueda Parcialmente Bloqueada (*Fixed Slip*) | 0.819 | 0.834 | 0.783 | 0.732 |
| Rueda Bloqueada (*Locked Wheel*) | 0.795 | 0.783 | 0.843 | 0.670 |
| Péndulo (BPT) | 0.665 | 0.732 | 0.670 | 0.830 |

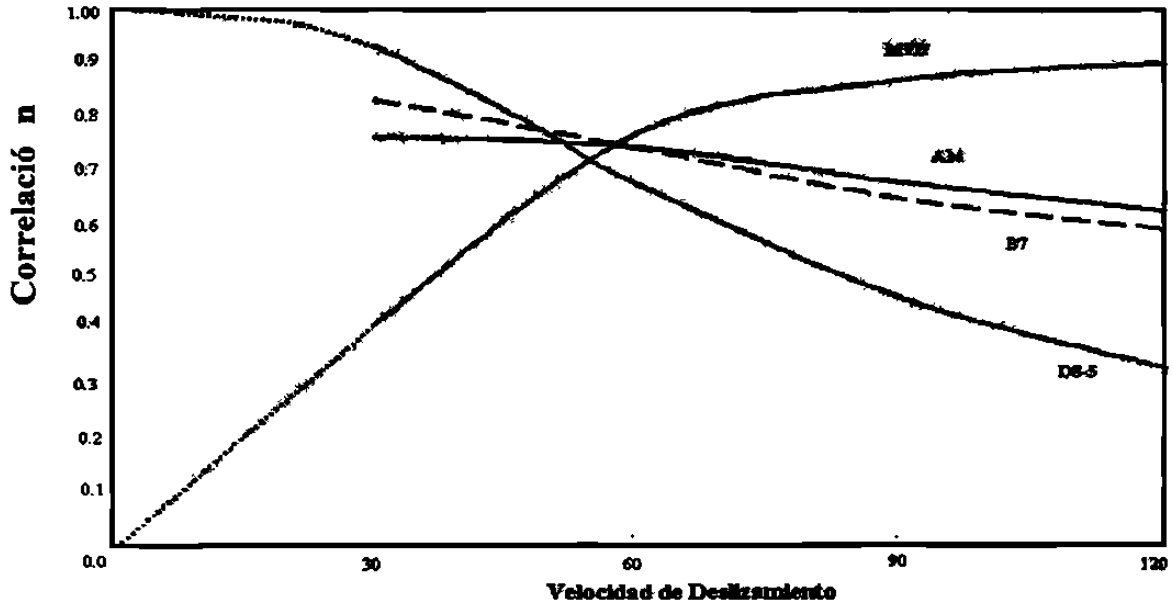



***Figura 3.6.*** *Comparación de las mediciones de textura con GF60 como una función de la Velocidad de deslizamiento*

Correlación ***R*** de GF(s) = a + (b* MPD)

## *III.IV.III Relación entre diferentes condiciones de medición de textura.*

El parámetro de la macrotextura ha sido clasificado en tres tipos :

MPD.- Equipos que usan perfilómetros para predecir la profundidad promedio de la textura (*Mean Profile Depth*).

RMS.- El cual es la media de la raíz cuadrada del perfil de la textura en milímetros (*Root Mean Square*).

*"Outflow time"*.- Es el resultado de la medida del equipo llamado "outflow meter"[*4]

La medida de referencia utilizada por PIARC para realizar las comparaciones entre los distintos valores de la textura fue el ensayo del *Círculo de Arena*, que proporciona un valor medio de la textura (MTD)

Se han encontrado buenas correlaciones (Tabla 3.3), y se ha concluido que es posible estimar la profundidad del ensayo del círculo de arena a partir de las medidas del perfil (MPD), por lo que se recomienda que las ecuaciones derivadas de este experimento se usen para convertir cualquier medida particular en medidas MPD para las aproximaciones a las medidas volumétricas MTD. Considerándose esto como el mejor paso hacia la armonización de las medidas de macrotextura

**Tabla 3.3**

*Correlaciones entre los diferentes métodos de medición de la textura*

| Parámetro de Textura | Numero de Equipos Usados | Rango del Coef. de Correlación |
|---|---|---|
| MPD | 5 | 0.906 – 0.950 |
| RMS | 10 | 0.793 – 0.939 |
| MTD | 1 | 0.929 |

# III.V Calibración de Equipos distintos a los que se utilizaron en el experimento de PIARC

Básicamente, la calibración de estos equipos consiste en el procedimiento que se usó para la armonización de los equipos participantes en el experimento internacional (estimar el *Gold Value* con F60 y Vp), es decir la medición de un tramo carretero con ambos equipos para correlacionar los valores obtenidos y ajustarlos después a la curva idealizada.

Por ejemplo[*5], si se utilizara un nuevo equipo de medición, diferente a los utilizados en el experimento de armonización. Primero se deberá medir el tramo de prueba calibrado, con los equipos ya estandarizado por PIARC, como un A2.Tx y el D3.$FR_s$,7 para estimar los valores de Vp y F60.

$$Vp = a + (b * Tx)$$

$$F60 = A + (B * FR_s * e^{\frac{S-60}{Vp}})$$

Posteriormente, se mide nuevamente el tramo calibrado; pero ahora con el equipo que se desea calibrar; en este caso, uno al que se llamará Eq.TX, para textura y otro Eq.$FR_s$, para fricción.

$$Vp = a + (b * Eq.TX)$$

$$F60 = A + (B * Eq.FR_s * e^{\frac{S-60}{Vp}})$$

Hechas las mediciones, se procede a establecer una correlación entre ambos equipos, para obtener las variables **a, b, A** y **B** de sus ecuaciones respectivas y así poder armonizar los valores con el modelo PIARC.

**F60**, es el valor de la fricción, idealizada, a una velocidad de deslizamiento de 60 kph.

**F(s)**, es el valor de la fricción, idealizada, a una velocidad de deslizamiento (slip speed) "s" dada.

**s**, es la velocidad de deslizamiento (*slip speed*), referida en el párrafo anterior, en kph.

**Tabla 3.4**

*Valores de **a** y **b** para estimar la constante de velocidad (Vp)*

| Macrotextura (TX) | a | b |
|---|---|---|
| ***MTD*** / Circulo de Arena (Eq.A8, método de prueba E-965 ) | -11.598 | +113.632 |
| ***MPD*** /Equipo VTI Mobile laser Profilometer (Eq. A2) | 14.234 | 89.719 |
| **MPD** /Equipo AEPO-RST ( Eq.A3E) | 21.9145 | 317.012 |
| **RMS** / Láser RST (Eq. A-E, España) | 9.6785 | 215.1516 |

**Tabla 3.5**

*Valores de **A** y **B** para estimar la fricción (F60)usando el modelo PIARC*

| Equipo ( según calculo de Vp) | A | B |
|---|---|---|
| (***MTD***) Péndulo Británico A14 o ASTM E-501 | 0.0778 | 0.007087 |
| (***MTD***) SCRIM del MOPTMA (España) | 0.0319 | 0.8734 |
| (**MPD**) Péndulo Británico A14 o ASTM E-501 | 0.5626 | 0.007564 |
| (**MPD**) Norsemeter AB4E-SLP-20 | 0.1191 | 0.6431 |
| (**MPD**) Norsemeter AB4E-SW-86 | - 0.03033 | 0.8641 |
| (**RMS**) Griptester (Eq. D8) | 0.08209 | 0.9104 |

# CAPÍTULO IV

# APLICACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL IFI

# IV.I Aplicación del Modelo IFI en Carreteras Nacionales

Dentro de las aplicaciones que tiene el modelo PIAR, para determinar el Indice de Fricción Internacional (IFI), es el diseño y administración de los pavimentos para carreteras de alta velocidad (principalmente), mediante el monitores de la superficie de rodamiento.

Este monitoreo se logra, mediante la medición de la profundidad media de la textura (TX) y el coeficiente de resistencia al deslizamiento, relacionado con la fricción (FRs), por medio del método del circulo de arena y el péndulo británico TRRL, respectivamente para este caso.

## *IV.I.I. Equipo Utilizado*

| Brigada 1. Macrotextura | Cantidad |
|---|---|
| ▪ Arena silica graduada limpia y seca | 20 kg |
| ▪ Vaso de precipitados | 4 pz |
| ▪ Escoba | 2 pz |
| ▪ Regla graduada | 4 pz |
| ▪ Mallas No.40, 70 y 100 | Reúso de arena |

| Brigada 2. Coef. Resistencia al deslizamiento | Cantidad |
|---|---|
| ▪ Péndulo Británico (TRRL) y accesorios | 1 Eq |
| ▪ Garrafón con agua | 20 lts |
| ▪ Botes para agua (Chicos) | 2 pz |
| ▪ Embudo | 1 pz |

| Brigada 3. Seguridad | Cantidad |
|---|---|
| ▪ Banderolas | 4 pz |
| ▪ Conos | 30 pz |
| ▪ Chalecos reflejantes | 6 pz |

Complementarios:

Agua potable, Cámara digital (con accesorios), Libreta de campo, Hojas blancas, Lápices, Marcadores de pavimento, Lonas, Impermeables, Lámparas y Juego de herramientas mecánicas.

## *IV.I.II Consideraciones y Procedimiento de Ensayo (Basado en PIARC)*

1. Los tramos en estudio se consideraron de 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 auscultación se señalizaron convenientemente según el manual de la SCT y las condiciones prevalecientes en el camino (Figura 4.1)
5. El Personal de trabajo se dividió en tres brigadas según el trabajo a realizar.
   - Brigada 1, para medir la textura superficial con el método del circulo de arena (Norma NLT 335/87).
   - Brigada 2, para medir las propiedades de fricción usando el Péndulo Británico (Norma ASTM E-303-93).
   - Brigada 3, personal de seguridad (Bandereros ) para el control del tránsito en los tramos de auscultación.

6. Las medidas de la textura se llevaron a cabo antes de realizar las mediciones de fricción, es decir, antes de mojar el pavimento.

En la siguiente figura se observa cómo puede hacerse el desvío de vehículos, para poder hacer la auscultación de la superficie de rodamiento.

Circulación Bandereros

***Figura 4.1.*** *Desvío del tránsito en una carretera*

A continuación se presentan los datos obtenidos de las mediciones con el círculo de arena y el péndulo de británico (TRRL) se obtuvieron los siguientes resultados de los tramos carreteros estudiados en:

- Querétaro
- Monterrey.

La memoria de cálculo se anexa en el [illegible]

## *IV.I.III. Caso Querétaro.*

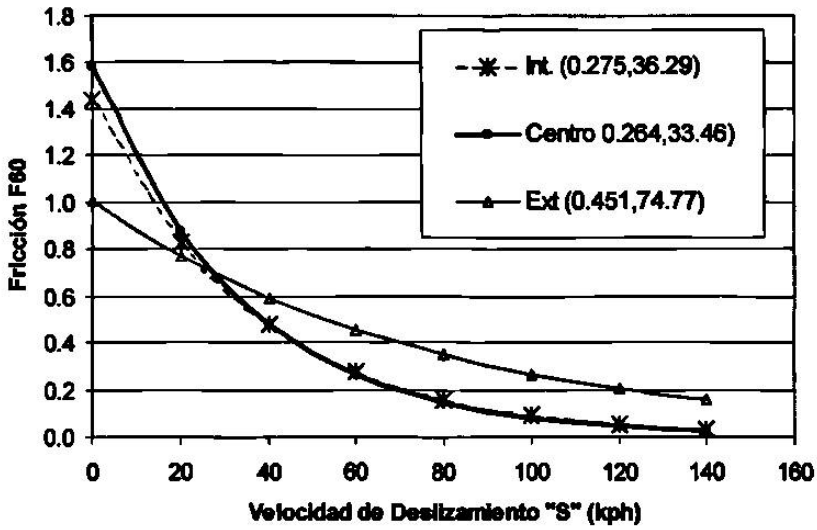
La selección de los tramos analizados para determinar el Indice de Fricción Internacional, en el estado de Querétaro, obedece a los análisis que ha efectuado el Instituto Mexicano del Transporte, sobre el Índice de Regularidad Internacional (IRI), con anterioridad, en dichos tramos.

Las figuras [illegible] a la [illegible] muestran en general:

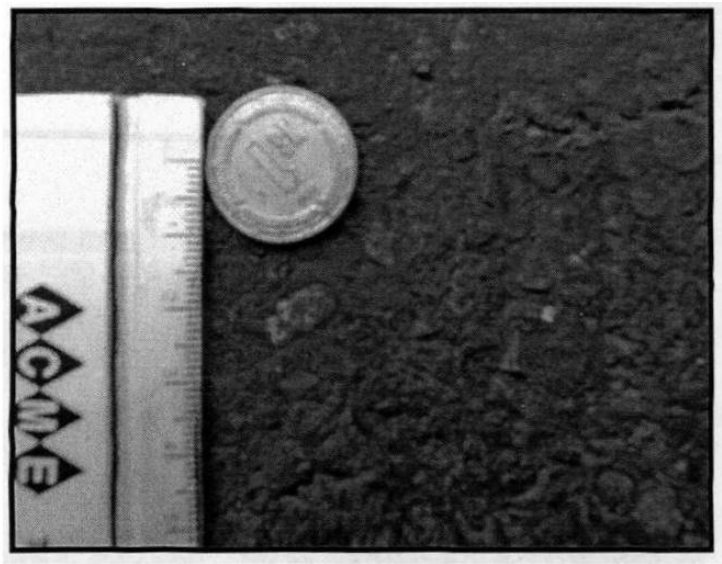
(a) El comportamiento de los datos obtenidos en campo, referenciados en la escala IFI. Esto se complementa con

(b) Fotos del pavimento estudiado.

- **PARQUE INDUSTRIAL BERNARDO QUINTANA (0+000KM)**



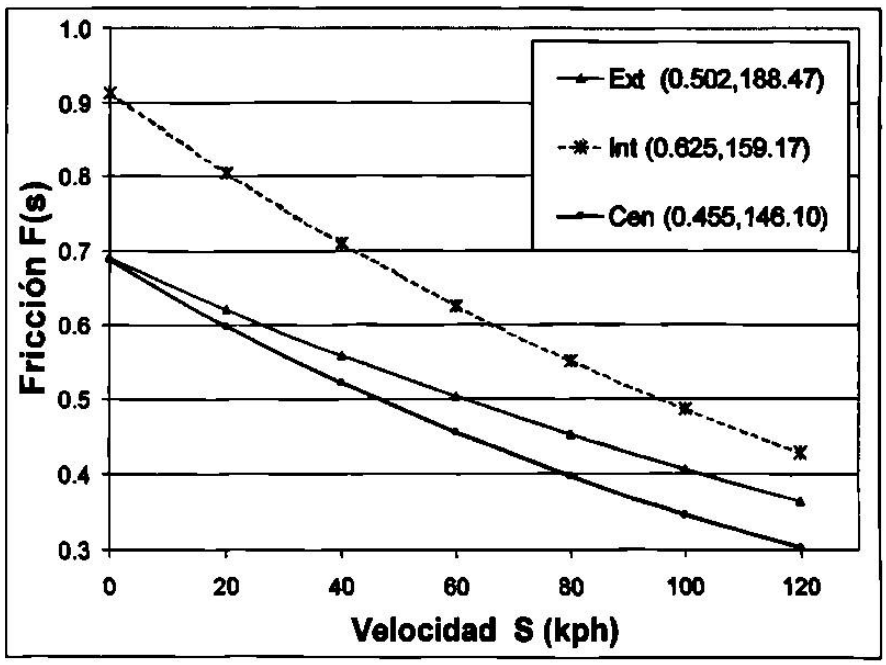

..... (a)



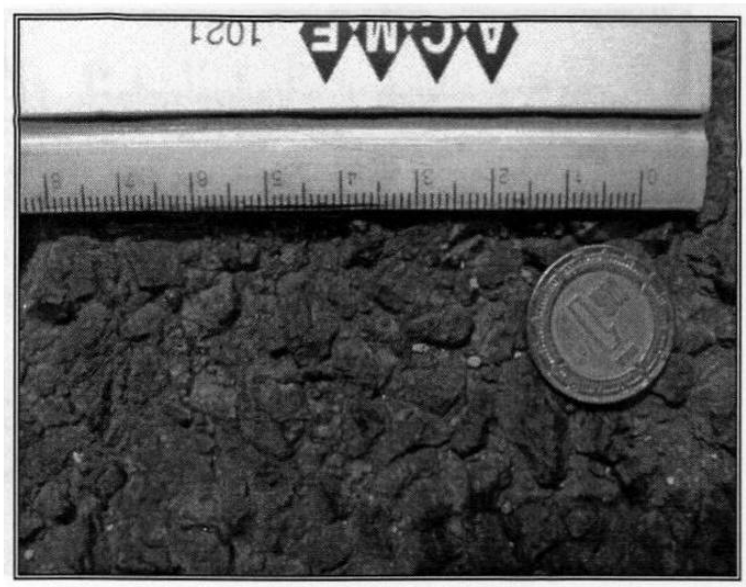

..... (b)

***Figura 4.2.*** *Comportamiento del modelo en los tres perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

- **SANFANDILA – IMT**



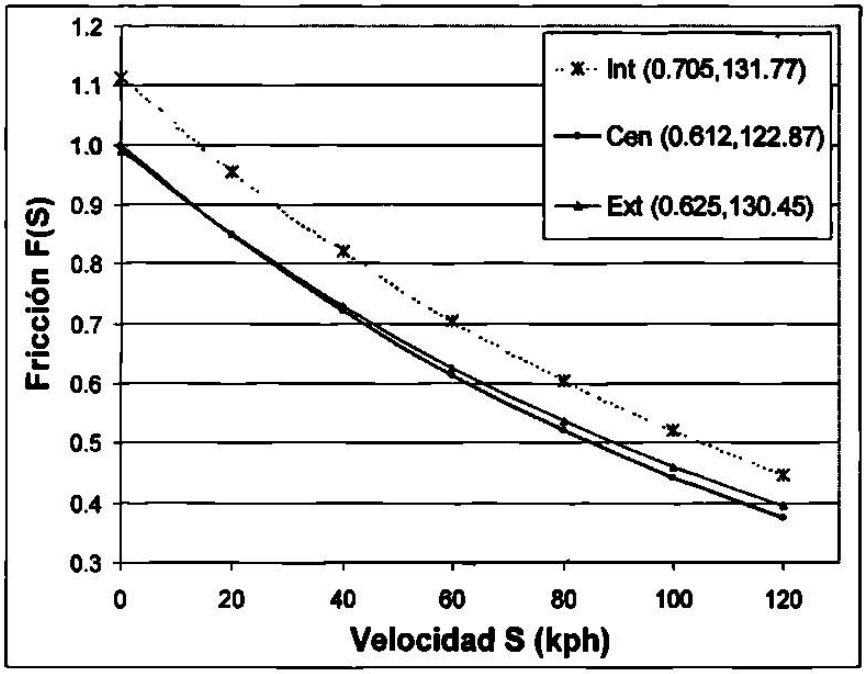

..... (a)



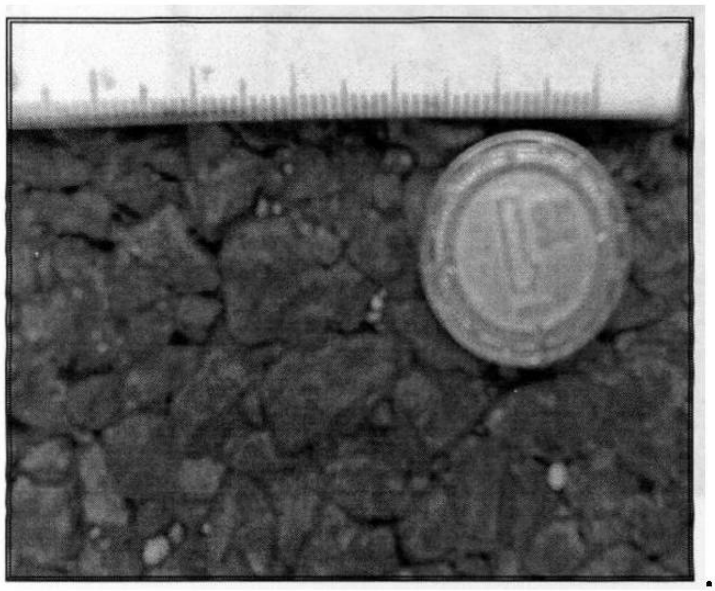
..... (b)

***Figura 4.3.*** *Comportamiento del modelo en los tres perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

- **IMT – LA VENTA**



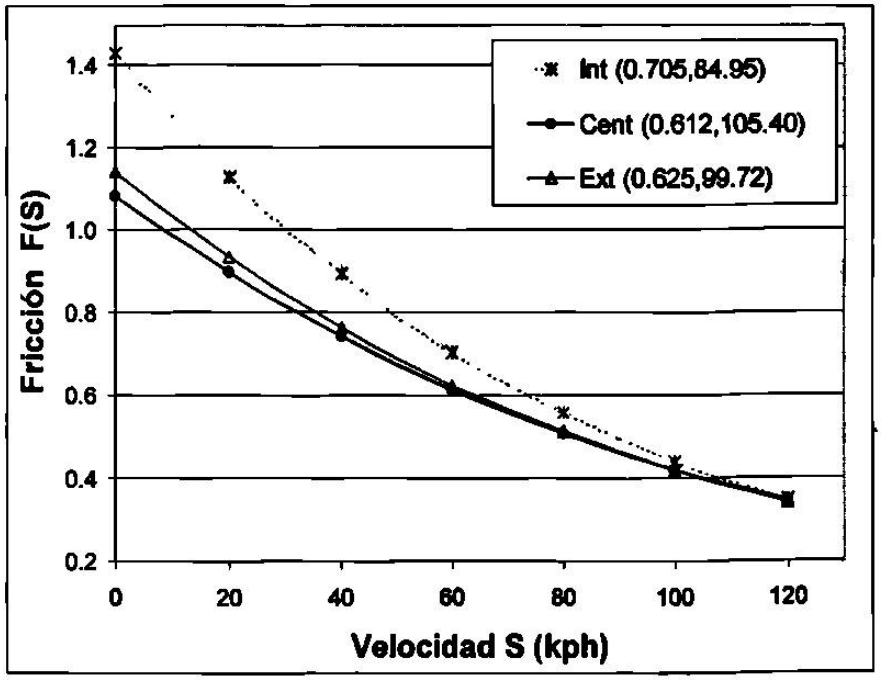

..... (a)



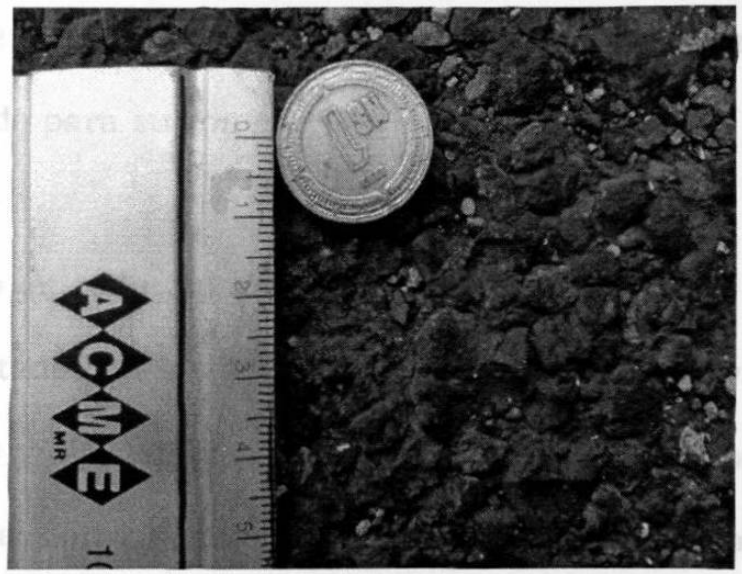
..... (b)

***Figura 4.4.*** *Comportamiento del modelo en los tres perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

- **LA VENTA – PEDRO ESCOBEDO**




..... (a)




..... (b)

***Figura 4.5.*** *Comportamiento del modelo en los tres perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

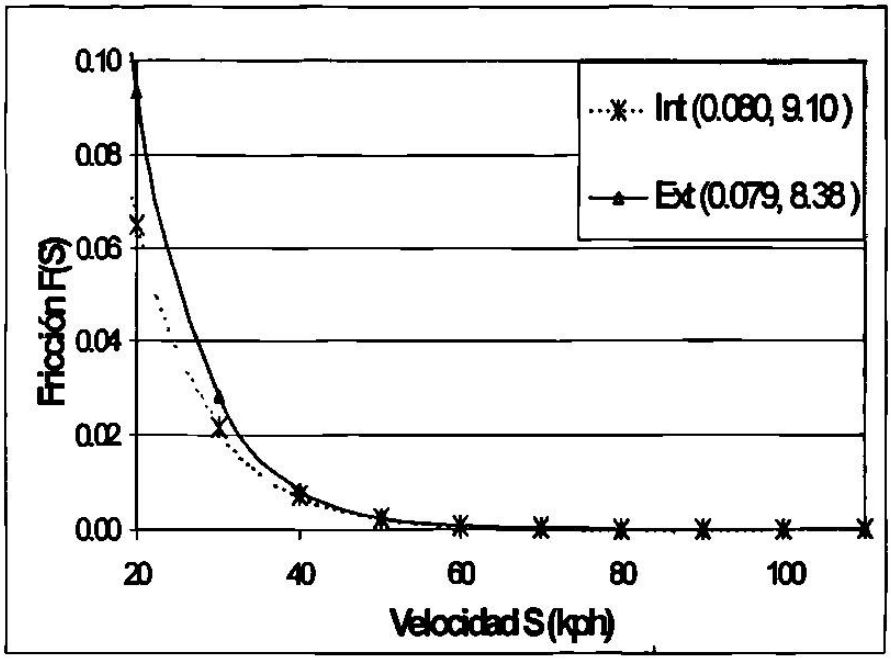
## *IV.I.IV. Caso Monterrey.*

La selección de estos tramos se basó en el análisis de las estadísticas de accidentes en condiciones húmedas, de acuerdo con la información proporcionada por la Unidad General de Servicios Técnicos de la Secretaria de Comunicaciones y Transporte, en Nuevo León.

Cabe mencionar que también se propuso el estudio en este Estado, debido a la características prevalecientes de sus superficies de rodamiento, tanto en las carreteras como en las arterias de la ciudad, que se pulen rápidamente por el agregado calizo (típico de la zona) utilizado para su contracción.

Debido a todo lo anterior, se podrá observar, que en los tramos presentados en las Figuras 4.6 a la 4.8, se observan valores muy bajos de F60 y Vp, debido a las condiciones de su superficie de rodamiento casi lisa, correspondientes a valores de profundidad de la macrotextura (TX) menores a los 0.2 mm (promedio del tramo)

- **CD. VICTORIA-MTY: KM 268+000 (RUTA 85)**



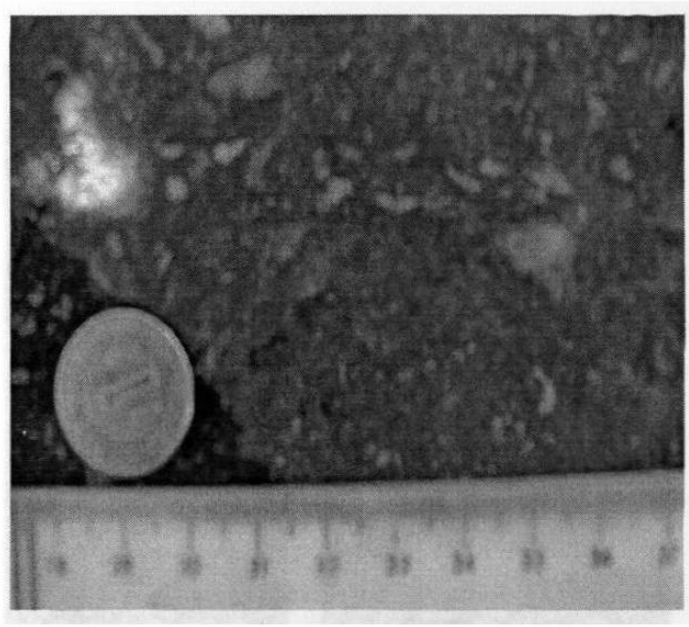
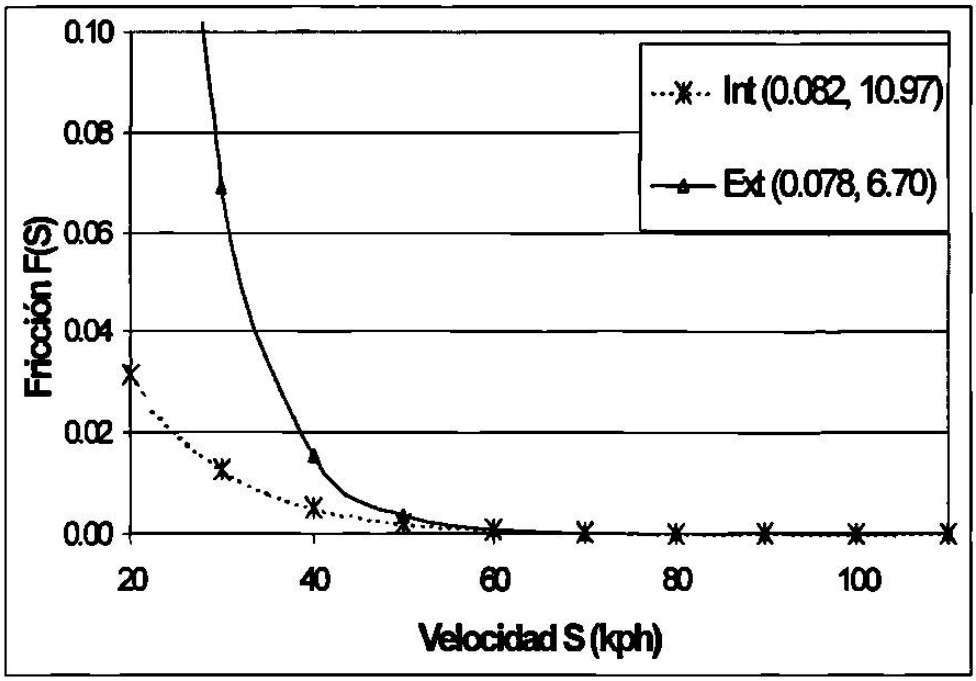



***Figura 4.6.*** *Comportamiento del modelo en uno de los perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

- **MTY-REYNOSA: KM 23+000 (RUTA 40)**



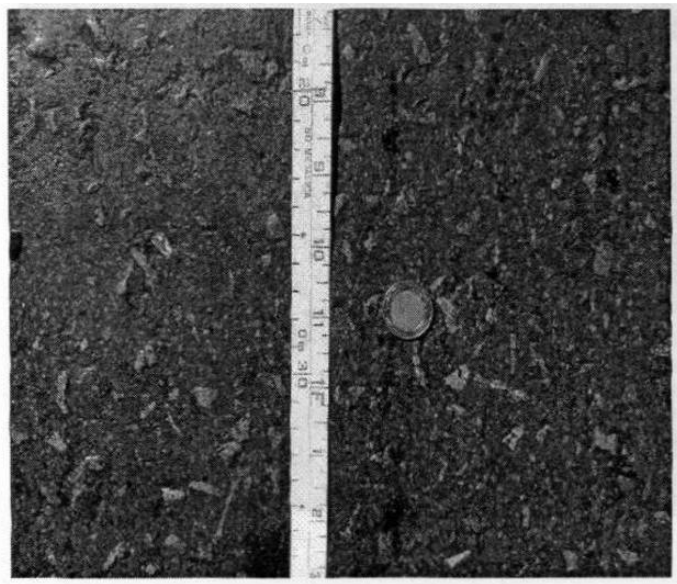
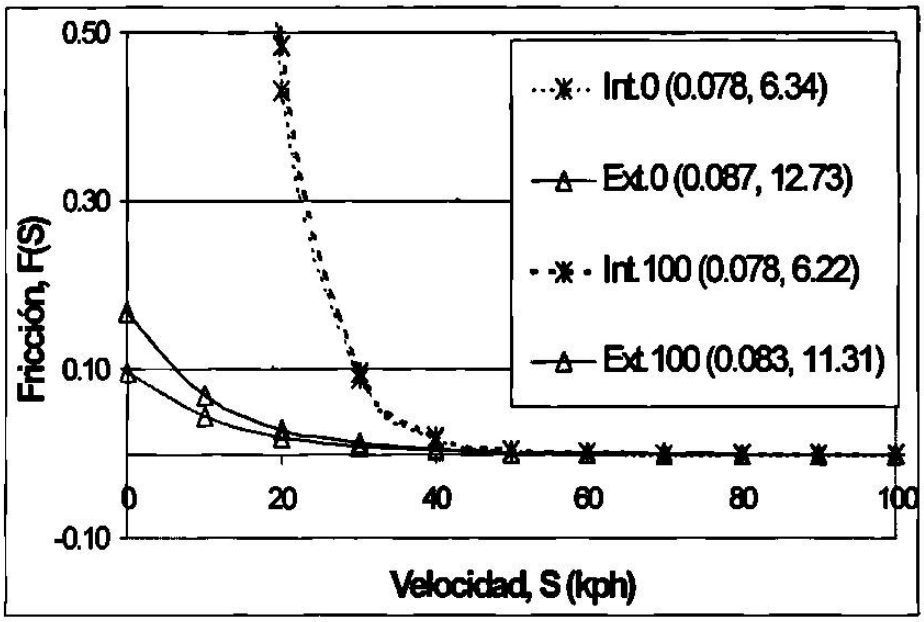



***Figura 4.7.*** *Comportamiento del modelo en uno de los perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*

- **MATEHUALA-SALTILLO: KM 207 (RUTA 57)**



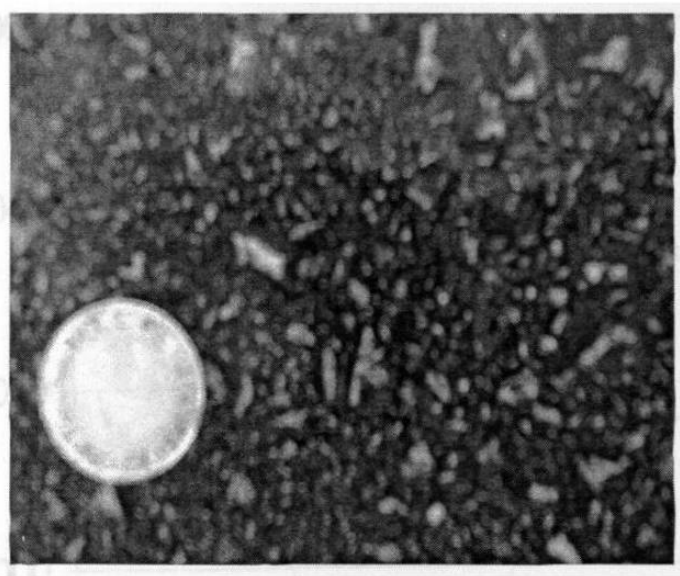



***Figura 4.8.*** *Comportamiento del modelo en dos perfiles (a), así como la apariencia representativa del pavimento (b).*