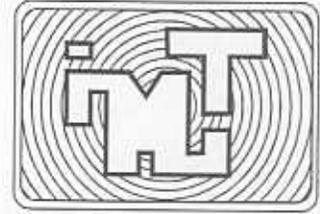
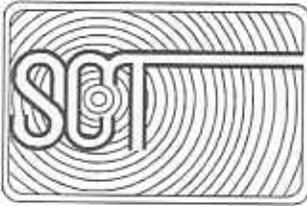


ISSN 0188-7297



DIAGNOSTICO DE LAS CARACTERISTICAS SUPERFICIALES DE LOS PAVIMENTOS

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Publicación Técnica No. 111
Sanfandila, Qro. 1998

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**Diagnóstico de las características
superficiales de los pavimentos**

**Publicación Técnica No. 111
Sanfandila, Qro. 1998**

El presente trabajo, ha sido elaborado en el Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores Mario C. Arriaga Patiño y Paul Garnica Anguas. Se contó con la revisión, comentarios y sugerencias del Ing. Rodolfo Téllez Gutiérrez, Coordinador de Infraestructura y del Ing. Alfonso Rico Rodríguez, Director General del Instituto Mexicano del Transporte.

RESUMEN

Este trabajo presenta la importancia de algunas características superficiales de los pavimentos y su impacto en la circulación, seguridad y costos de operación de los vehículos, así como métodos y equipos que se utilizan para valorar eficientemente estas condiciones. Así mismo, se describe la influencia de la superficie de rodamiento en la interacción vehículo-carretera y se proporcionan algunas recomendaciones para incluirse en la normativa vigente del Sector Transporte.

ABSTRACT

This paper presents some of the pavement smoothness factors that affect the efficient movement of the vehicles over the highway users, variations and reduction on optimum travel speeds, disrupt traffic flows, creation of the safety hazards and of course, direct repercussions on the final user's costs. Some of the methods and devices for measuring these condition are described also. Likewise, this work covers the effect of vehicle-pavement interaction along the highways and they are provided some recommendations in order to include in the actual normative.

RESUMEN EJECUTIVO

Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos

Mario C. Arriaga Patiño

Paul Garnica Anguas

Investigadores del IMT

Uno de los aspectos de una carretera que interesa conocer es el estado de la superficie de apoyo, denominada capa de rodamiento, ya que de ésta depende la valoración del usuario de la carretera en su conjunto. En ella aparecen, antes o después, los problemas propios de todas las capas que conforman el pavimento.

Algunas características superficiales de los pavimentos son:

- Regularidad superficial
- Resistencia al deslizamiento o derrapamiento
- Drenaje superficial
- Permeabilidad
- Resistencia al rodamiento
- Consumos debidos al contacto neumático-pavimento
- Propiedades reflejantes y de color
- Proyección de agua al paso de los vehículos
- Ruido entre el contacto neumático-pavimento

Las características superficiales de los pavimentos influyen en diversos aspectos del funcionamiento de una carretera, tales como seguridad, comodidad, tiempos de recorrido, costos de operación y dinámica de los vehículos que circulan. Su duración depende del proyecto inicial, de la calidad de construcción del pavimento, materiales utilizados, del desgaste producido por los vehículos, así como del deterioro producido por los factores climáticos, entre otros.

En nuestro país la mayoría de los caminos pavimentados los constituyen los llamados "pavimentos flexibles", aunque también existen tramos en autopistas y en la red federal de carreteras conformados por los "pavimentos rígidos". Las características superficiales de ambos tipos de pavimentos deben reunir ciertas características que minimicen que el estado del pavimento sea una de las causas de accidentes. Otro aspecto que depende del estado superficial es el gasto de operación derivado del uso de la carretera (gasto de combustibles, desgaste y reparaciones de partes mecánicas, consumo de neumáticos, etc.; o indirectos como tiempo de viaje, confort, etc.).

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de vehículo, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando el vehículo está inmóvil o bajo un pequeño movimiento uniforme existen presiones verticales sobre el pavimento, mientras que cuando está en movimiento aparecen además esfuerzos horizontales debidos al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones en el agua contenida en el pavimento y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la superficie de rodamiento.

Para estudiar los efectos que los pavimentos provocan en la circulación es necesario recurrir a rangos de la geometría de la superficie de rodamiento. Como producto de varios estudios, la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras, ha adoptado una clasificación de las diferentes características de la superficie de la carretera según las distintas escalas geométricas y se ha identificado su presencia en el funcionamiento vehículo-carretera.

De esta manera se ha encontrado que la microtextura que presenta un pavimento 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. La macrotextura es el relieve de la capa de rodamiento a simple vista, y está relacionada directamente con el drenaje superficial del pavimento, influye en la proyección de agua de los vehículos durante y después de una precipitación. La megatextura y la regularidad superficial (rugosidad) tienen

influencia en la comodidad, estabilidad de manejo, cargas dinámicas, desgaste y costos de operación de los vehículos. El estado superficial de una carretera es vital para la eficiencia global del transporte.

La adherencia entre el neumático y el pavimento se valora midiendo el coeficiente de fricción de la rueda en presencia del agua. Tradicionalmente se ha caracterizado mediante el péndulo de fricción, que da una indicación indirecta del grado de lisura o rugosidad de la microtextura de la superficie de rodamiento. Actualmente existen diversos equipos de alto rendimiento que, con diferentes principios (trayectoria de la rueda, rueda frenada, neumático liso, etc.), miden la resistencia a la fricción. Por su parte la textura es una característica que cada día se considera más importante para la buena calidad de las capas de rodamiento, su drenaje, su sonoridad, etc.

La medición de la rugosidad sirve como un parámetro de control de calidad en obras nuevas, llegándose a ofrecer estímulos económicos cuando se alcanzan valores superiores a los especificados en el contrato de obra o a sancionar en caso contrario. La rugosidad superficial se valora actualmente mediante un indicador de amplia difusión denominado Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Para su medida se emplean diversos equipos, los mecánicos o tradicionales u otros más modernos, basados en técnicas de "no contacto" mediante el rayo láser que reproduce el perfil longitudinal en una o más líneas del pavimento, que normalmente coinciden con las trayectorias de las ruedas de los vehículos.

Además del IRI, existe un parámetro denominado Índice de Fricción Internacional (IFI), el cual permite referir a una escala patrón, las condiciones de textura y fricción de un pavimento, medido con cualquier tipo de equipo o método. Este índice está en estudio en diversos países para su posible implementación.

Palabras clave: Características superficiales, capa de rodamiento, pavimentos, microtextura, macrotextura, megatextura, rugosidad, textura, resistencia al deslizamiento, acuaplaneo, Índice Internacional del Rugosidad, Índice de Fricción Internacional.

INDICE

	Página
Resumen, abstract	I
Resumen ejecutivo	III
Introducción	1
1. Tipos de pavimentos en México	3
A) Pavimentos flexibles	
B) Pavimentos rígidos	
2. Area de contacto, presión de contacto y tiempo de carga	7
3. Características superficiales, influencia en la interacción vehículo-carretera	9
A) Microtextura	
B) Macrotextura	
C) Megatextura	
D) Regularidad superficial	
4. Medida de la adherencia neumático-pavimento	19
4.1 Medida de la textura	
4.2 Medida de la resistencia al deslizamiento (fricción)	
4.3 Evolución del coeficiente de resistencia al deslizamiento	
4.4 Índice de Fricción Internacional (IFI)	
5. Medida de la regularidad superficial (rugosidad)	33
Conclusiones y recomendaciones	43
Bibliografía	47

INTRODUCCION

Las características superficiales de los pavimentos son las relacionadas con las capas de rodamiento. Su importancia deriva de la influencia que tienen en la funcionalidad de la carretera. Su duración depende del proyecto inicial, de los materiales empleados, de la calidad de construcción y del desgaste o deterioro ejercido por el tránsito y los factores climáticos, entre otros.

Todos los pavimentos de las carreteras sufren un proceso de degradación bajo la acción del tránsito, resultando este proceso más lento, si el pavimento está bien diseñado y bien construido. Por otro lado, los cambios térmicos diarios y estacionales, la humedad, la insolación y el régimen de lluvias originan modificaciones en los materiales de la capa de rodamiento con tendencias a la fragilización y a la pérdida de calidad.

Durante el periodo de servicio, un pavimento se deteriora de formas diferentes. La aptitud de reparto de cargas y de resistencia a las deformaciones y a la fisuración, bajo la acción repetida de cargas del tránsito, causa defectos en la superficie del pavimento, tales como fisuras, agrietamiento, roderas o deformaciones y otros. Si no se detiene a tiempo la degradación, puede llegar a resentirse la estructura total del pavimento, lo que obligará a una reconstrucción.

Las propiedades superficiales de un pavimento deben mantenerse en condiciones aceptables durante la vida de la carretera. El deterioro de estas características es a veces independiente de la falla estructural del pavimento; de esta manera hay que prever acciones sobre la carretera tendientes únicamente al mantenimiento de las características superficiales.

Las características superficiales interesan al usuario de la infraestructura carretera, ya que de ellas depende, en gran medida, su seguridad, comodidad de circulación, tiempo de recorrido y los costos de operación. En el medio urbano, estas características interesan incluso a los habitantes del lugar.

Además de que existen diversos factores que afectan la seguridad al transitar por un camino (tipo y condiciones mecánicas de vehículo, estado de los neumáticos, conductor, factores ambientales, características geométricas del camino, señalamiento, etc.), la superficie de una carretera debe reunir ciertas características que minimicen el riesgo de que sea el estado del pavimento una de las causas que provocan accidentes.

Se pueden citar algunas características superficiales de los pavimentos:

- Regularidad superficial
- Resistencia al deslizamiento o derrapamiento
- Resistencia al rodamiento
- Influencia del contacto neumático-pavimento en el consumo de combustible
- Propiedades reflexivas y de color
- Resistencia al ataque de aceites y combustibles
- Drenaje superficial y permeabilidad
- Ruido de contacto neumático-pavimento
- Proyección de agua al paso de los vehículos

Estas características influyen sobre los diversos aspectos relativos a la funcionalidad de las carreteras, siendo los más notables:

- Seguridad
- Confort
- Costos de operación
- Dinámica de los vehículos

Las exigencias de los usuarios de las carreteras van aumentando en forma continua y lo que ahora se considera de calidad excepcional puede evaluarse dentro de un cierto tiempo como de calidad media. Como resultado de la comparación con mejores pavimentos, se advierte ya una cierta presión sobre los ingenieros responsables de la construcción, conservación y operación de las carreteras, principalmente en lo referente a las autopistas de cuota en el país.

1. TIPOS DE PAVIMENTOS EN MEXICO

En México casi la totalidad de los caminos pavimentados son de los llamados "pavimentos flexibles". Existen además algunos tramos en autopistas concesionadas y en la red federal conformados con "pavimentos rígidos", con una longitud del orden de 700 km.

A. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas (sección estructural) constituidas por materiales con resistencia y deformabilidad decreciente con la profundidad, de modo análogo a las disminuciones de las presiones transmitidas desde la superficie. La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento, soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales de la carretera. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales (Figura 1).

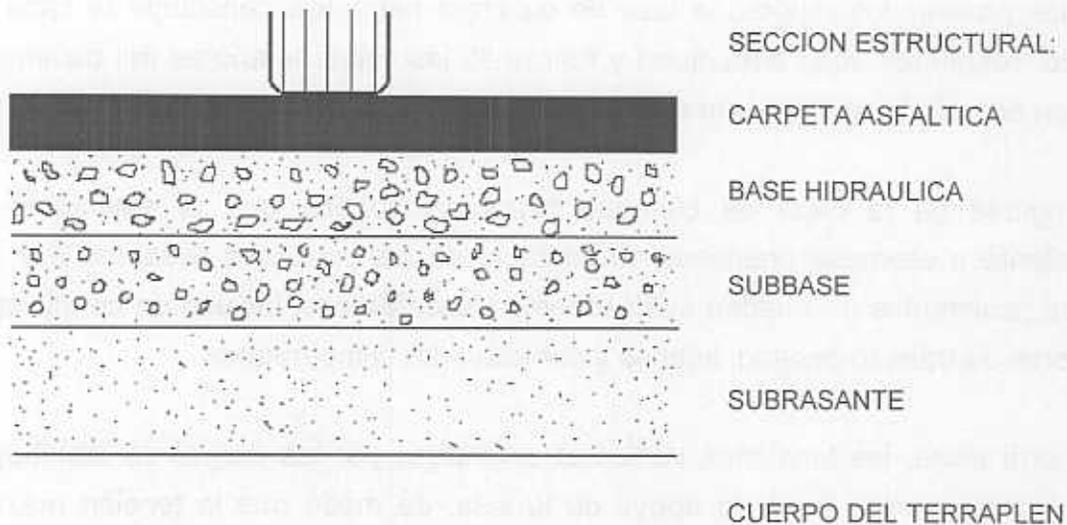


Figura 1. Conformación típica de un pavimento flexible.

Debido al comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas asfálticas, el paso de la carga, especialmente en condiciones de altas temperaturas o bajas velocidades, va produciendo una acumulación de deformaciones de tipo plástico.

Si la mezcla asfáltica no tiene las características reológicas adecuadas, puede darse incluso una verdadera fluencia del material. Este fenómeno tiene su manifestación más típica en las denominadas roderas, que son deformaciones plásticas longitudinales que se pueden llegar a producir en determinadas zonas de rodamiento de los vehículos pesados o por la canalización excesiva del tránsito. En ocasiones, el fenómeno de deformaciones plásticas se pone de manifiesto mediante ondulaciones o resaltos transversales. Esto puede ocurrir en zonas en las que los esfuerzos tangenciales son muy fuertes (zonas de desaceleración, paradas ante semáforos o topes, etc).

El Instituto Mexicano del Transporte publicó un trabajo denominado "Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas", (Ref. 1), en el cual se describen los deterioros superficiales más comunes que se presentan en los pavimentos flexibles, así como las probables causas para cada uno.

B. PAVIMENTOS RIGIDOS

En los pavimentos rígidos, la losa de concreto hidráulico constituye la capa de mayor responsabilidad estructural y funcional; las capas inferiores del pavimento tienen por misión asegurar un apoyo uniforme y estable para la losa (Figura 2).

La rigidez de la capa de concreto hidráulico supone que el pavimento es resistente a elevadas presiones de contacto de los vehículos pesados. Por ello estos pavimentos no pueden sufrir roderas viscoplásticas, incluso en condiciones severas de tránsito pesado, intenso y con elevadas temperaturas.

Por otra parte, las tensiones verticales originadas por las cargas se distribuyen ampliamente en la base de apoyo de la losa, de modo que la tensión máxima transmitida es sólo una fracción pequeña de la máxima presión de contacto.

La resistencia al deslizamiento se consigue empleando una capa de arena silícica y dando al concreto fresco una textura superficial adecuada, mediante el arrastre de una arpillera y por cepillado, estriado, ranurado, etc. La macrotextura debe ser

rugosa para altas velocidades de circulación y puede ser más lisa para velocidades moderadas o bajas.

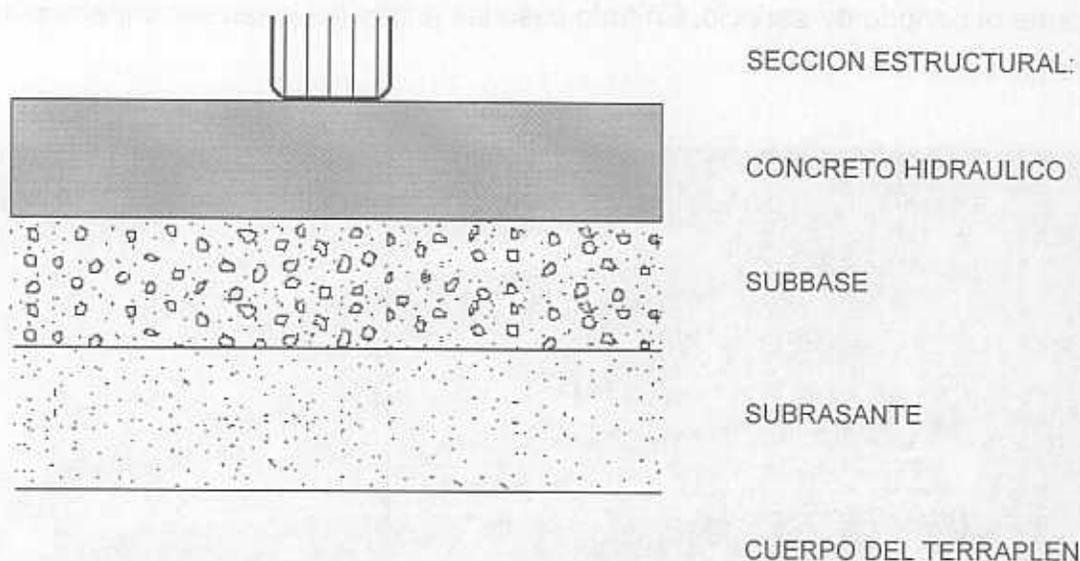


Figura 2. Conformación típica de un pavimento rígido.

El tipo de textura influye en el ruido producido en el rodamiento, percibido tanto dentro como fuera de los vehículos.

En la regularidad superficial obtenida influyen factores tales como la puesta a punto de la pavimentadora, la homogeneidad del concreto, el camino de rodamiento de la maquinaria, los elementos de guiado y la regularidad de la puesta en obra (Figura 3).

La retracción inicial del concreto hidráulico y las variaciones de volumen hacen necesaria la disposición de juntas para evitar la aparición aleatoria de fisuras en el pavimento, muchas de las cuales se despostillan bajo la acción directa del tránsito; al propio tiempo, las fisuras más abiertas permitirán la entrada de agua y se puede presentar el fenómeno de bombeo, el cual, con la expulsión de partículas finas de las capas inferiores hacia la parte superior del pavimento, puede llegar a generar problemas serios, pues algunos bloques pueden quedar inestables. Por otro lado, también son necesarias las juntas para facilitar el alabeo de las losas debido a los gradientes térmicos.

Esta solución de continuidad del pavimento no debe afectar sin embargo a las cualidades estructurales y funcionales. Es necesario asegurar con las juntas una cierta transmisión de cargas de una losa a la siguiente y evitar un escalonamiento durante el periodo de servicio. En todo caso las juntas deberían ser imperceptibles para los usuarios.



Figura 3. Colocación del concreto hidráulico con máquina extendedora.

El concreto hidráulico aumenta su resistencia con el tiempo y si la concepción del pavimento ha sido correcta, su índice de servicio disminuye más lentamente que el que presentan pavimentos con carpeta asfáltica.

Otras características que reciben cada vez más atención por razones de seguridad y economía, son las propiedades ópticas reflectantes de los pavimentos. El color claro de la superficie seca del concreto hidráulico proporciona una mejor visibilidad nocturna, lo que se traduce en un aumento en la seguridad de operación.

2. AREA DE CONTACTO, PRESION DE CONTACTO Y TIEMPO DE CARGA

La caracterización de las solicitaciones producidas por el tránsito sobre una infraestructura carretera es bastante compleja, debido no sólo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para dicha caracterización se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- a) Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones sobre la misma.
- b) Velocidad de los vehículos y el tiempo de solicitación en un punto.
- c) Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (tipos de ejes que circulan).
- d) Estado tensional que producen las cargas, en función de la magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc.) y las características de las capas del pavimento.

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento, además de variar la forma de la huella, aparecen solicitaciones distintas a las verticales, que son las que existen cuando el vehículo está detenido o con movimiento uniforme: aparecen esfuerzos horizontales debidos al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

La distribución de presiones dentro del área de contacto no es uniforme. Aunque las presiones localizadas pueden tener importancia en la aparición de los

deterioros, suele admitirse la hipótesis de que es suficiente considerar una presión de contacto media igual al cociente de la carga de la rueda y la superficie del área de contacto aparente. Esta presión no es idéntica a la de inflado del neumático, pero la mayoría de los fabricantes proporcionan ábacos o tablas que relacionan las dos cuando el vehículo está detenido, dependiendo del tipo de neumático.

Los efectos dinámicos de los vehículos en movimiento se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y del tipo de suspensión del vehículo. En general, los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varía con la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un cuarenta o un cincuenta por ciento (40 o 50%) superiores a los normales con carga estática. Este aumento de cargas se refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de huella.

La duración de la carga o el tiempo de aplicación equivalente es inversamente proporcional a la velocidad del vehículo. Este tiempo de carga es importante al estudiar la respuesta de los supuestos materiales viscoelásticos (terreno de cimentación, capas granulares y mezclas asfálticas).

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado tensodeformacional del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan tensiones tangenciales, deben ser resistidas por los 8 - 10 cm superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores. Por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas, es proyectar capas de rodamiento cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan roturas o deformaciones por cizallamiento.

3. CARACTERISTICAS SUPERFICIALES, INFLUENCIA EN LA INTERACCION VEHICULO-CARRETERA

Para analizar los efectos que los pavimentos (flexibles y rígidos) provocan en los vehículos es necesario recurrir a escalas pequeñas que permitan apreciar magnitudes del orden de décimas de milímetro o incluso menores. Se ha llegado al empleo de microscopios para estudiar los efectos de las dimensiones más pequeñas del pavimento en la adherencia.

En el XVIII Congreso Mundial de Carreteras (Bruselas, 1987) el Comité Técnico de Características Superficiales de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (A.I.P.C.R.), propuso una clasificación de las características geométricas superficiales basadas en longitudes de onda y en amplitudes de las irregularidades (Tabla 1). Hay que tener en cuenta que las características superficiales de los pavimentos que más interesan están ligadas a las dimensiones de estas irregularidades. Además, se dispone actualmente de métodos de medida de las mismas, cuyos resultados han empezado a incorporarse a las especificaciones en otros países.

NOMBRE		RANGO DE DIMENSIONES (APROX.)	
		HORIZONTAL	VERTICAL
* MICROTATURA		0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
* MACROTATURA		0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
* MEGATATURA		50 - 500 mm	1 - 50 mm
* REGULARIDAD SUPERFICIAL	Ondas cortas	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
	Ondas medianas	5 - 15 m	5 - 50 mm
	Ondas largas	15 - 50 m	10 - 200 mm

Tabla 1. Propuesta de clasificación de las irregularidades superficiales de un pavimento (flexible o rígido).

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 4 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.

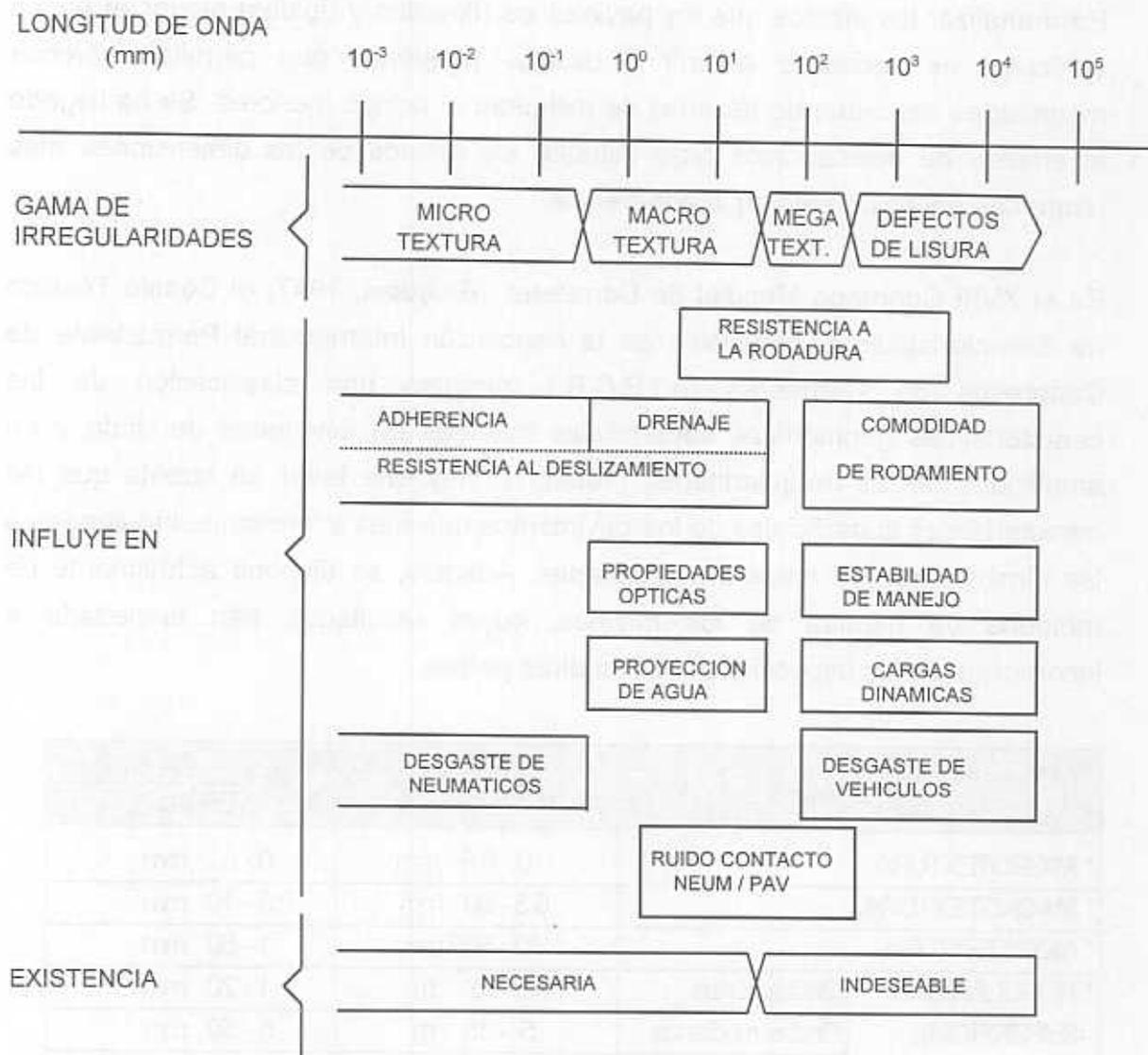


Figura 4. Influencia de la gama de irregularidades superficiales en los fenómenos de interacción entre vehículo y la carretera (A.I.P.C.R. 1987), Ref. 5.

A. Microtextura. La microtextura es función de la textura superficial de los agregados y del mortero asfáltico o del cemento (concreto hidráulico), empleados

en la construcción de la carpeta o losa (Figura 5). Es importante para la adherencia entre el neumático y pavimento y, por tanto, para la resistencia al derrapamiento, por lo que la microtextura influye en el riesgo de accidentes para todas las velocidades de circulación. Influye en el desgaste de los neumáticos y en el ruido producido por el contacto con el pavimento. En todo caso, las irregularidades de este tipo están presentes y en ciertas condiciones su existencia es necesaria.

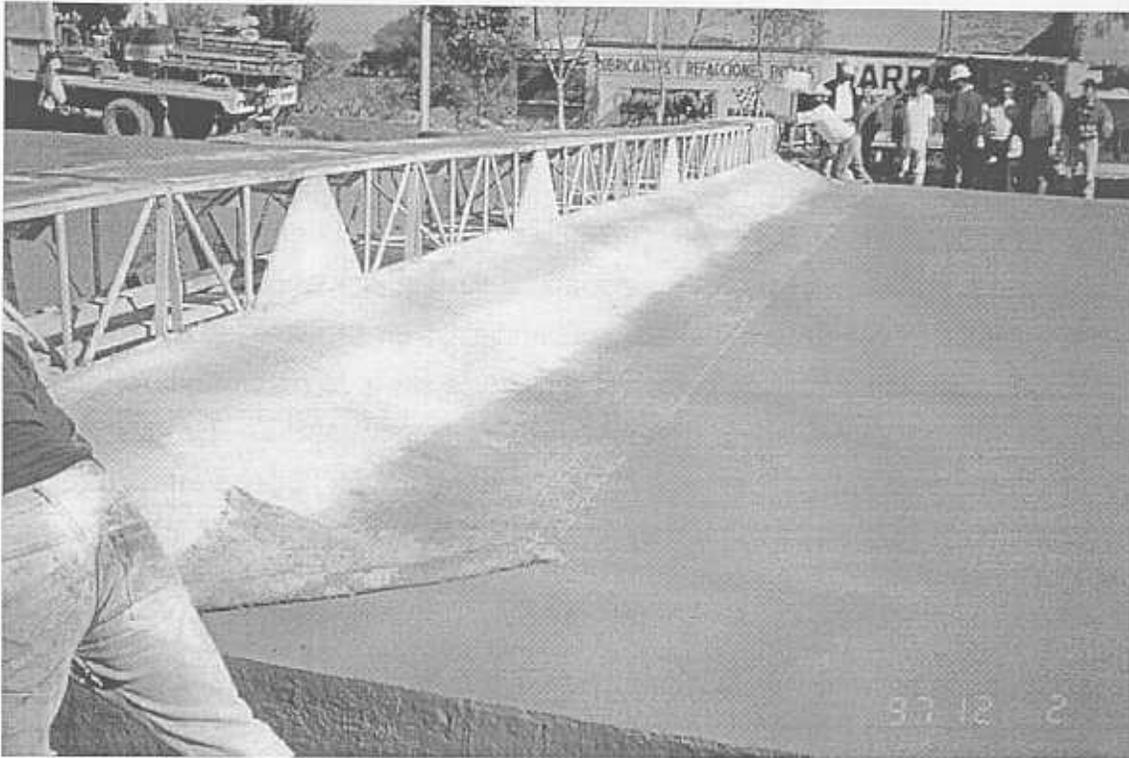


Figura 5. Aplicación de tela de yute para la microtextura en un pavimento de concreto hidráulico.

B. Macrotextura. La macrotextura es el relieve de la capa de rodamiento y depende de la composición de la mezcla, riego o lechada asfáltica o del tratamiento de superficie dado a la capa de concreto (estriado, engravillado, etc.). Degradaciones tales como pérdida de gravilla, grietas y la existencia de juntas, sólo contribuyen en casos poco frecuentes o si hay escalonamiento notable. En la Figura 6 se puede observar gráficamente la diferencia entre la microtextura y la macrotextura de un pavimento.

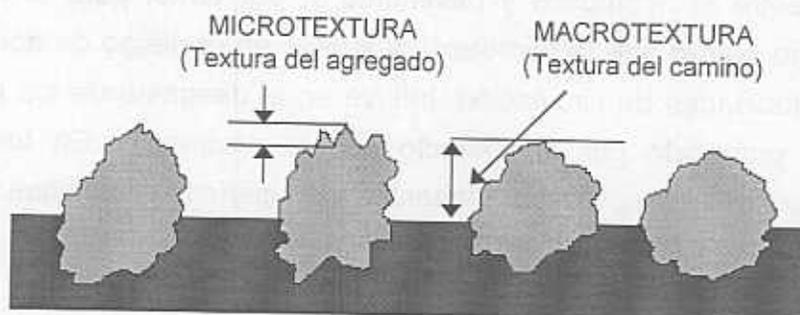


Figura 6. Microtextura y Macrotextura.

La macrotextura es asimismo significativa en la evolución del estado de la capa de rodamiento. El pavimento recién construido tiene un determinado valor de la macrotextura, pero con el uso ese valor inicial va disminuyendo hasta un mínimo; a partir de ese momento y como consecuencia de un proceso de deterioro, con pérdida de cohesión entre los componentes de la capa, la macrotextura vuelve a crecer de forma significativa. Por lo que es importante en los análisis de auscultación, discernir si el valor del parámetro es bueno (macrotextura correspondiente a una fase inicial) o es malo (el mismo valor en una fase terminal).

En la Figura 7 se observa la macrotextura final en un pavimento de concreto hidráulico y el procedimiento en fresco utilizado.

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidad media y elevada (más de 60 km/hr) 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 en zonas urbanas (velocidades moderadas) es adecuada una macrotextura moderada y una microtextura áspera, en carreteras interurbanas será conveniente que exista además una macrotextura rugosa (Figura 8).

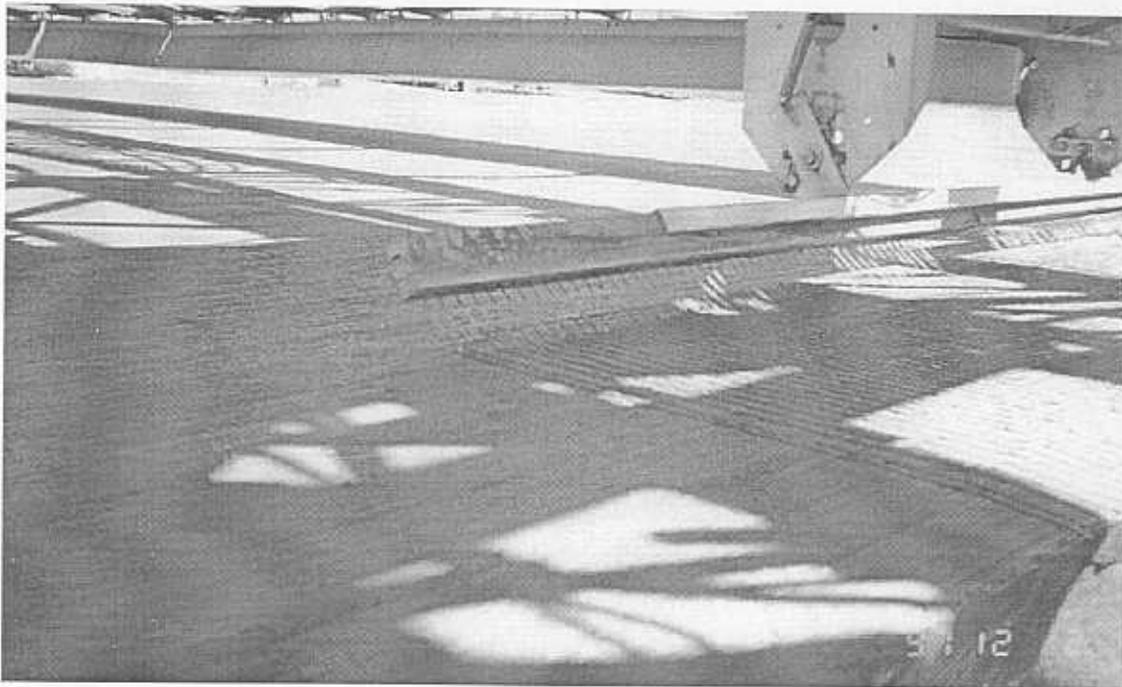


Figura 7. Texturizado de una losa de concreto hidráulico (macrotextura).

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 de 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 redundará en mejorar la seguridad de operación al evitarse el acuaplaneo.

La macrotextura se divide en dos: la positiva y la negativa. La primera es típicamente la que se obtiene a través de los tratamientos superficiales (riegos de sello). La segunda se refiere a las mezclas porosas o drenantes. 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 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.

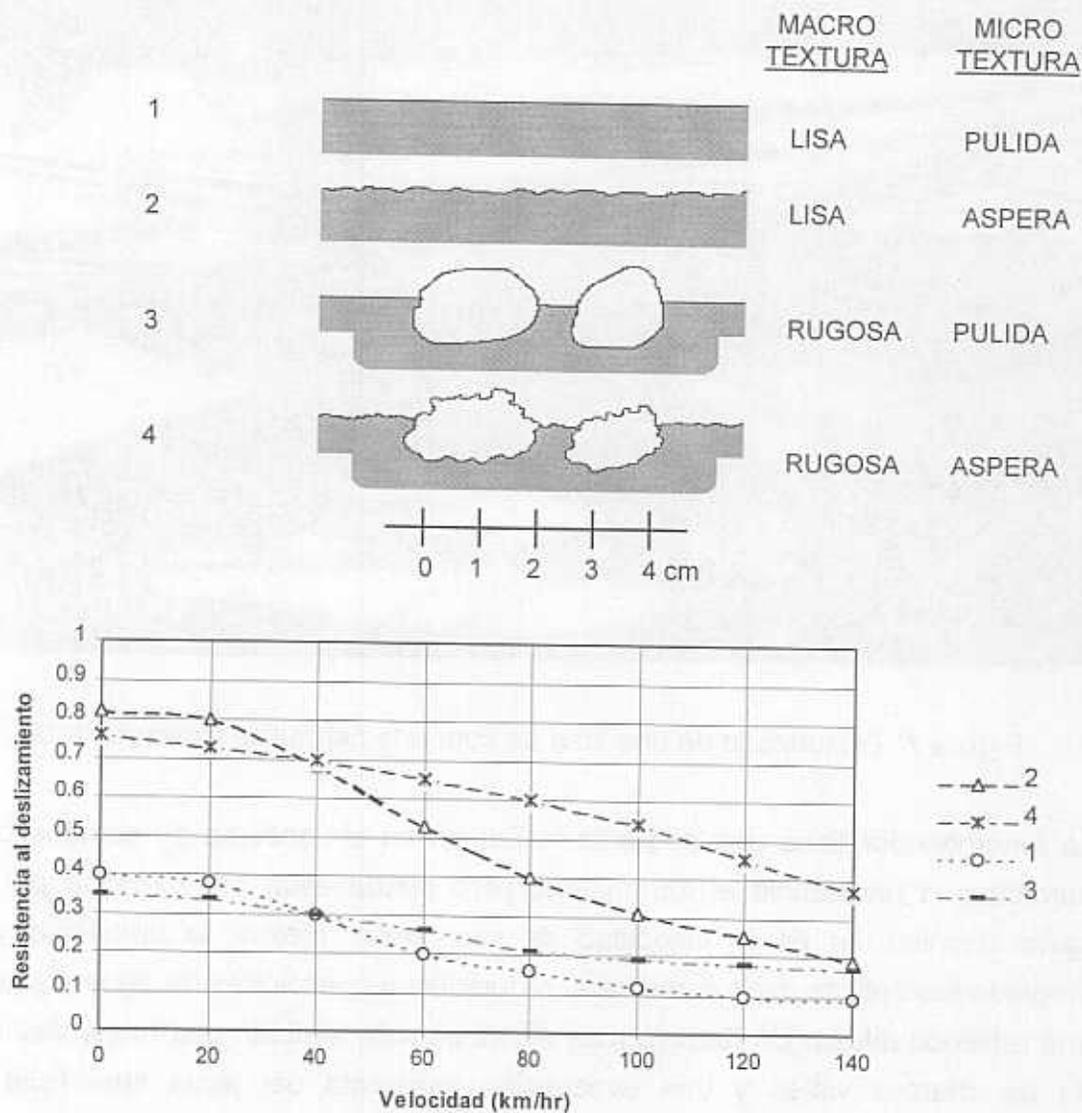


Figura 8. Influencia de la textura y la velocidad en el coeficiente de resistencia al deslizamiento.

La Figura 9 esquematiza la condición existente en la superficie de contacto entre el neumático y un pavimento mojado. Esta se puede dividir en tres zonas:

La zona 1, situada inmediatamente delante del neumático (según el avance), existe una película de agua de grueso espesor, que desarrolla una presión hidrodinámica que "levanta" el neumático y disminuye el contacto con el pavimento.

La zona 2 representa la fracción de la huella del neumático que circula sobre una película fina de agua, una vez que la mayor parte ha sido previamente drenada en la zona anterior. En esta zona no existe presión hidrodinámica, pero sí otra presión en el agua, que depende de la velocidad de circulación, de la presión de inflado de los neumáticos y de la viscosidad del agua, que en general está contaminada por polvo, combustibles, etc., y que contribuyen frecuentemente a derrapamientos sobre la superficie de rodamiento.

En la zona 3, se ha desplazado la película de agua y existe un contacto casi en seco entre el neumático y el pavimento. Para obtener una zona 3 de dimensiones suficientes, hay que eliminar el agua, por lo que se necesita una capacidad de evacuación mayor de la que proporciona el dibujo del neumático. Esto se obtiene con la macrotextura suficientemente gruesa.

En la zona 3 y, en menor parte en la zona 2, la microtextura logra atravesar la partícula delgada de agua residual para producir puntos de contacto en "seco" y asegurar así la adherencia. Al aumentar la velocidad o el espesor de la película de agua, disminuye la zona 3, aumenta la 1 y se reduce la adherencia, provocando el acuaplaneo.

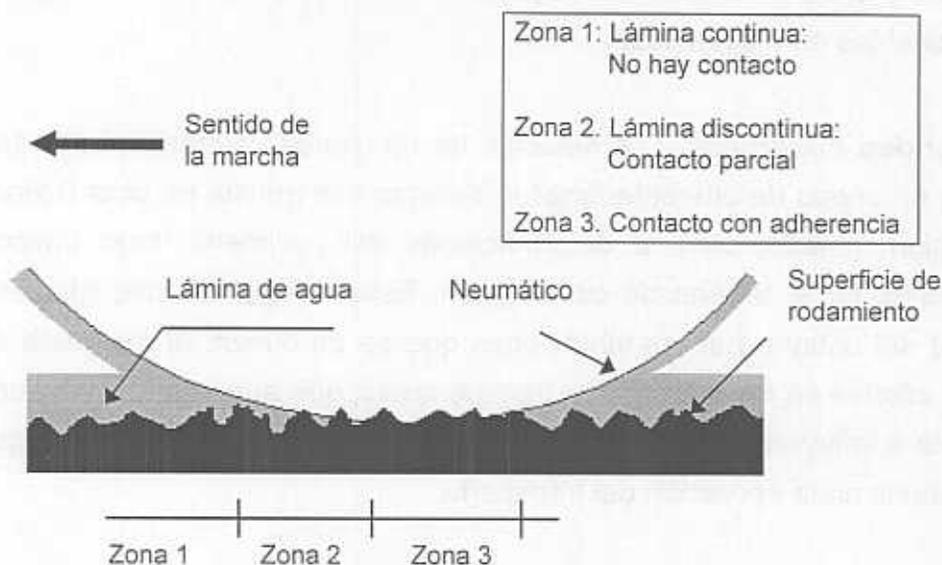


Figura 9. Condición de contacto entre una rueda en movimiento y una superficie mojada.

El acuaplaneo o hidroplaneo se define como el fenómeno que se produce cuando un neumático que rueda o desliza sobre una película de agua existente en un camino, pierde el contacto con el pavimento a causa de las presiones de agua que se desarrollan en la superficie de contacto neumático-pavimento, al incrementarse a una cierta velocidad el vehículo. Cuando la pérdida de contacto es total, no pueden desarrollarse esfuerzos cortantes, por lo que el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el pavimento desciende hasta valores de cero fricción.

C. Megatextura. La megatextura corresponde a irregularidades del tipo intermedio, relacionada con la textura final y también con diversos tipos de fallas o degradaciones y sus reparaciones. Los pavimentos de adoquín pueden dar lugar también 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 incómoda, 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 define la megatextura no son deseables en ningún caso.

D. Regularidad superficial. Los defectos de regularidad superficial o rugosidad se reflejan en ondas de diferente longitud debidas a la puesta en obra (extensión, compactación, guiado, etc.), a deformaciones del pavimento bajo tráfico 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 las mercancías transportadas, 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.

La regularidad superficial es una característica que se valora midiendo la geometría longitudinal de un camino, definida por longitudes de onda comprendidas entre 0.5 m y 50 m. La A.I.P.C.R. ha clasificado estas

irregularidades en tres clases de ondas, según su longitud y amplitud: ondas cortas, ondas medias y ondas largas.

Cada tipo de irregularidad está relacionada con diversos efectos no deseados; así, cuando mayor es la velocidad del vehículo, más le afectan las irregularidades de gran longitud de onda, pues influyen en la estabilidad del vehículo y la comodidad del usuario. Las ondas cortas y medianas con amplitudes elevadas pueden ocasionar la pérdida de contacto entre el pavimento y el neumático, reducir la maniobrabilidad del vehículo (incluyendo en superficie seca); producen una oscilación de las cargas sobre las ruedas, dando lugar a cargas dinámicas que incrementan el consumo de combustible. En definitiva, la irregularidad superficial afecta tanto la comodidad como la seguridad y los costos de operación de los vehículos que circulan.

También es importante considerar las irregularidades por deformaciones plásticas longitudinales, que afectan la maniobrabilidad y seguridad en las carreteras, conocidas con el nombre de roderas (Figura 10), medidas por la profundidad máxima en un perfil transversal respecto a la línea horizontal teórica; la medida se puede hacer manual o automáticamente. Valores superiores a 10 - 15 milímetros indican roderas significativas.

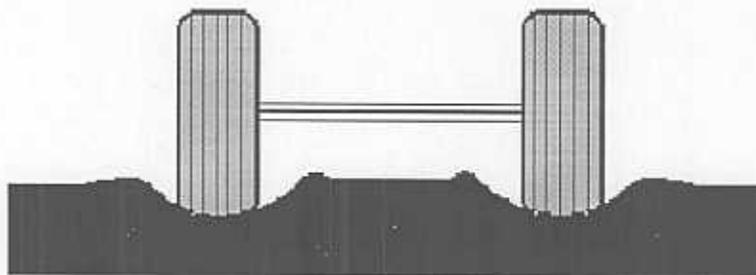


Figura 10. Roderas en un pavimento flexible.

4. MEDIDA DE LA ADHERENCIA NEUMÁTICO-PAVIMENTO

En la fase de operación de una carretera construida con pavimento flexible o rígido, hay un fenómeno directamente relacionado con la presencia de agua que es la causa de algunos accidentes. Se trata de la pérdida de adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento cuando esta última está mojada. El fenómeno se produce con una carretera mojada, aunque se agrava conforme aumenta el espesor de la película de agua.

La adherencia neumático-pavimento es un factor fundamental que interviene en la seguridad de la circulación sobre pavimento flexible o rígido, ya que permite reducir la distancia de frenado y mantener, en todo momento, la trayectoria del vehículo.

La adherencia neumático-pavimento puede definirse como la capacidad de unión o contacto íntimo entre dichos elementos, de forma que dé origen a una circulación segura. En general el conductor es muy sensible a la ausencia o disminución de la adherencia que se produce cuando la superficie está mojada, con hielo, etc, existiendo pérdida de control del vehículo por deslizamiento, patinazo o derrapamiento.

La adherencia es suficiente, salvo en algunos casos (exceso de asfalto, pulido de la superficie, neumáticos lisos, etc.), sobre superficie seca, disminuyendo extraordinariamente en periodos de lluvias debido a la película de agua que se interpone entre el neumático y el pavimento. Si el pavimento está mojado, se aprecia una disminución en la adherencia con la velocidad. Esta pérdida es tanto mayor cuanto más gruesa sea la película de agua sobre el pavimento, lo que se traduce en una conducción peligrosa incluso para velocidades moderadas (40-50 km/hr).

El estado del neumático influye, de forma significativa, sobre la distancia de parada del vehículo. En la Referencia 7 se menciona que para unas condiciones dadas, un vehículo ligero necesita el doble de distancia de parada si circula con

neumáticos desgastados en vez de nuevos, sobre pavimento mojado. Mientras que en el caso de los vehículos pesados, el incremento de la distancia de parada es del 50% para las mismas condiciones anteriores. Los vehículos pesados requieren mayores distancias de parada que los vehículos ligeros debido al peso total, a la carga del vehículo, sistemas de frenos, presión de inflado de los neumáticos, suspensión, etc.

Las capas de rodamiento de los pavimentos de carreteras 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 (dibujo) del neumático. Si la velocidad de circulación es elevada, la capacidad de drenaje del agua es insuficiente, elevándose sensiblemente el riesgo de que la rueda patine o deslice al producirse la pérdida de contacto. El riesgo de la accidentalidad es aún mayor si en las anteriores circunstancias se añaden otros factores negativos, como puede ser el circular con neumáticos desgastados.

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).

El coeficiente de fricción a baja velocidad depende del número de puntos de contacto en seco entre el neumático y los agregados del pavimento tanto mayor cuando más áspera sea la textura, cuando se produce tras la ruptura de la película de agua residual por efecto de la microtextura. 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 (tanto mayor cuanto más gruesa).

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. Esta diferenciación es importante, según el tipo de estudio que se realice. Los equipos estacionarios y muy lentos pueden servir para estudios de un tramo en específico o de investigación, pero, al requerir cortar el carril en que se realiza el estudio y su bajo rendimiento, no son apropiados para la auscultación sistemática de la red carretera. Para evaluar ésta se utilizan equipos rápidos de alto rendimiento que no provoquen molestias posibles al tránsito.
- ♦ 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.

4.1 Medida de la textura

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

- Método volumétrico
- Medida del drenaje superficial (drenómetros)
- Determinación del perfil

El método volumétrico, también conocido como 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 (50 cm^3) de arena fina uniforme, de manera que cubra todas las irregularidades de la superficie (Figura 11), 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. Dividiendo el volumen de arena utilizada por el área cubierta se obtiene la denominada "profundidad media de textura" (H) correspondiente a las irregularidades de la superficie, tanto mayor cuanto más rugosa es la macrotextura.

En España, para pavimentos de concreto hidráulico vibrado se especifica que 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 recepción de capas de rodamiento con material asfáltico, la textura no deberá ser inferior a 0.7 mm.

Los drenómetros caracterizan la capacidad del drenaje superficial, función de la macrotextura, por el valor inverso del tiempo que se emplea en evacuar superficialmente un volumen conocido de agua.

La determinación del perfil a la escala de la macrotextura suele hacerse con perfilómetros láser, que emiten un rayo sobre un punto del pavimento y 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.

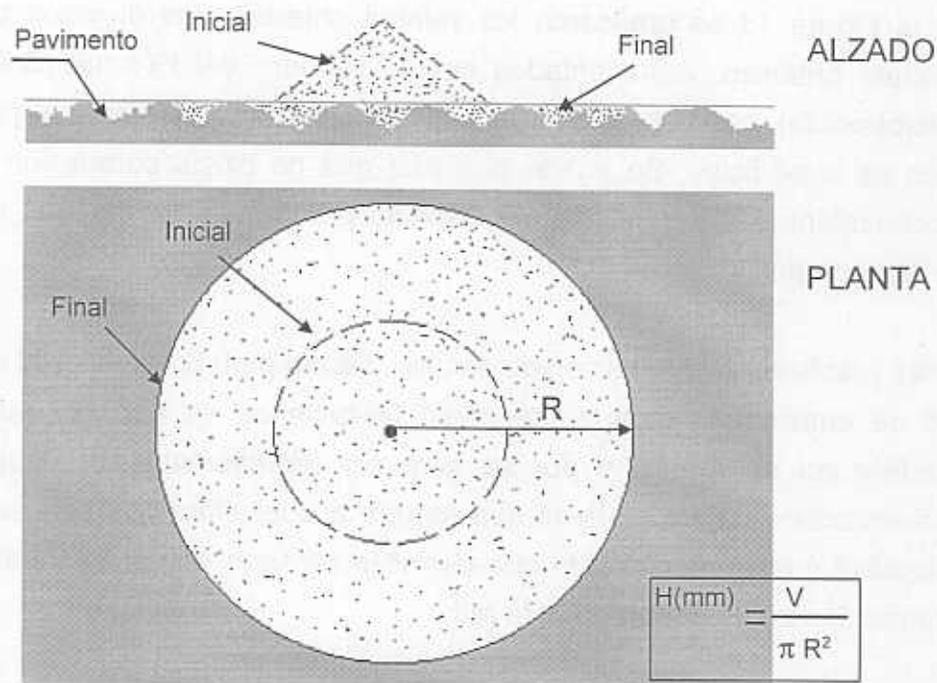


Figura 11. Esquema del ensayo del círculo de arena.

4.2 Medida de la resistencia al deslizamiento (fricción)

Tradicionalmente se ha caracterizado el coeficiente de resistencia al deslizamiento mediante el péndulo de fricción. Este tipo de equipo da una indicación indirecta del grado de rugosidad que proporciona la microtextura del pavimento.

El péndulo de fricción se utiliza en dos formas distintas:

- a) En el ensayo para la determinación del coeficiente de pulimento acelerado de los agregados, empleando una zapata de goma de tamaño reducido, sobre la superficie de las probetas diseñadas con los agregados a ensayar, que han sido sometidos anteriormente a un proceso de desgaste.

b) Directamente sobre la superficie de la carretera, empleando una zapata de mayor tamaño que la anterior (ver Figura 12), sobre la superficie mojada del pavimento.

En la Figura 13 se graficaron los valores obtenidos en diversos puntos con el péndulo británico, representados con el Número del Péndulo Británico (BPN), (microtextura) y con el método del círculo de arena (macrotextura) para diferentes tipos de superficies. Se puede observar que no existe correlación entre ambos procedimientos, por lo que la microtextura parece ser, en general, independiente de la macrotextura.

Estas prácticas puntuales son de escasa utilidad para determinar el estado de una red de carreteras, ya que presentan limitaciones de uso por su lentitud, por interferir en el tránsito y por su pequeña representatividad espacial. Para la conservación integral se tiene que recurrir a auscultaciones con equipos de alta velocidad y gran rendimiento que permitan recoger, con la frecuencia necesaria, información de estado de toda la red.

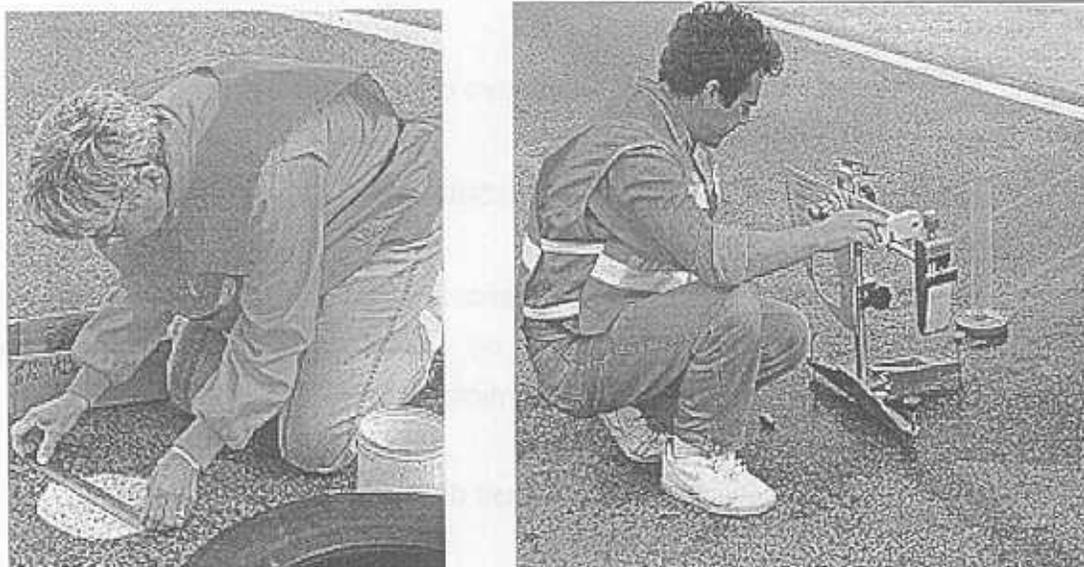


Figura 12. Evaluación de un pavimento con el método del círculo de arena y el péndulo de fricción.

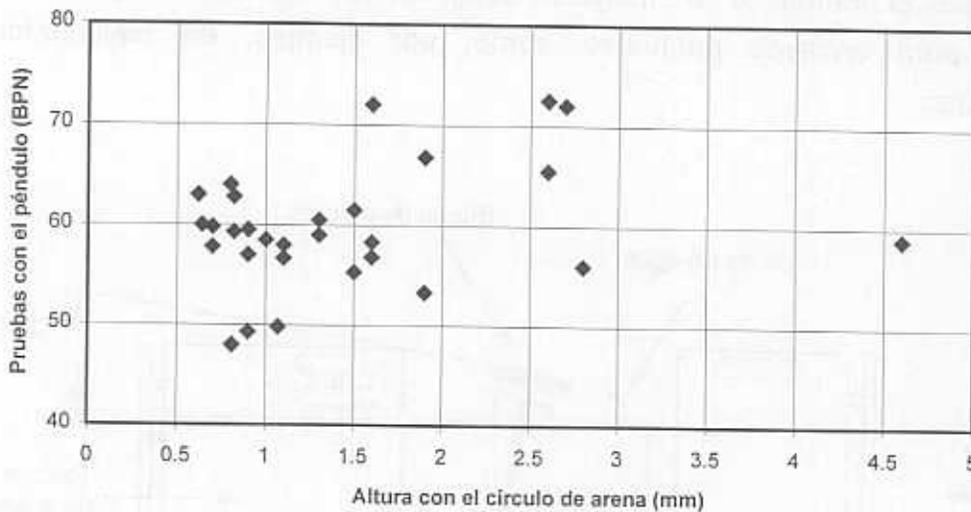


Figura 13. Valores del péndulo de fricción y el círculo de arena para diversos puntos.

Para medir directamente la fricción, se tiende cada vez más a utilizar equipos de mayor rendimiento, 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), de origen británico y extendido por diversos países de Europa (Inglaterra, Francia, Italia, Alemania, España, etc.). La velocidad relativa de la rueda de estos equipos respecto al pavimento es del orden de la velocidad del vehículo multiplicado por el seno del ángulo de deriva, 20° en el caso del SCRIM (ver Figura14).

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 ensayos puntuales, como, por ejemplo, en pavimentos de aeropuertos.

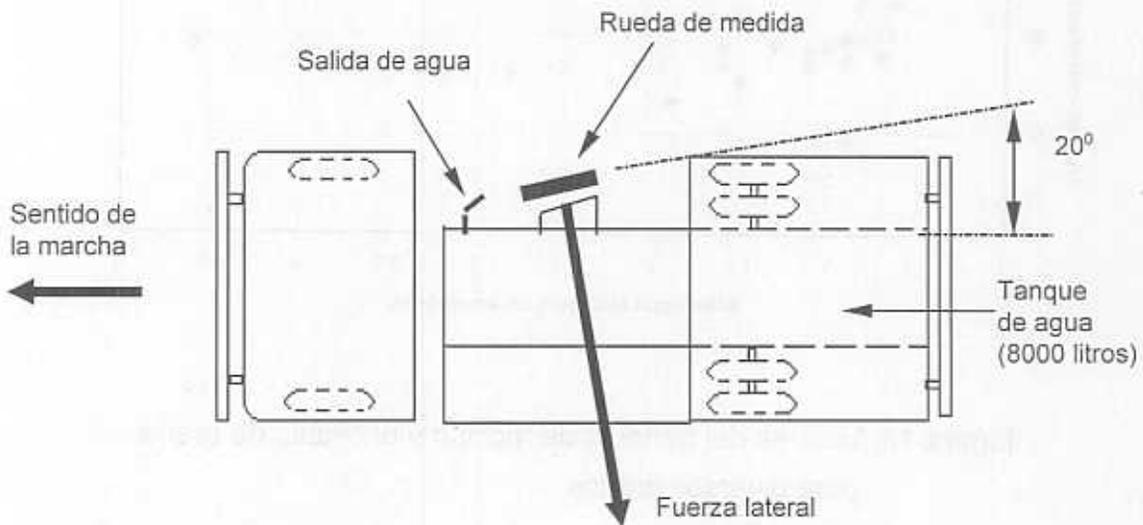


Figura 14. Equipo para la medida del coeficiente al deslizamiento.

Los equipos de rueda parcialmente bloqueada suelen operar con un deslizamiento comprendido entre el 10% y el 20%. Como la velocidad de deslizamiento es el producto de la velocidad de desplazamiento del vehículo por el porcentaje de deslizamiento, en realidad mide la fricción a baja velocidad y, por tanto, como en el caso de los equipos de rueda oblicua, estos equipos son sensibles principalmente a la microtextura.

Existen también equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable, que se emplean para diversos estudios de medida de fricción; por ejemplo, para determinar el valor máximo del coeficiente de rozamiento en una determinada modalidad de frenado.

Otro aspecto por el que se diferencian los equipos de medida de fricción es por el tipo de neumático de la rueda de medida (diagonal o radial; estriado o con dibujos). Los neumáticos de los equipos para medir la resistencia al deslizamiento deben cumplir unas características precisas especificadas en normas. Para evitar cambios importantes debidos al envejecimiento del caucho, deben fabricarse en cantidades relativamente pequeñas, por lo que su costo es elevado.

En México, Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) cuenta con equipo para determinar el coeficiente de fricción para la auscultación sistemática de los pavimentos de los aeropuertos nacionales en pistas, zonas de rodaje y plataformas, tanto en pavimentos secos como en pavimentos húmedos, debiendo cumplir éstos con normas internacionales (ver Figura 15).

Los coeficientes obtenidos con los diversos procedimientos y equipos de medida de la resistencia al deslizamiento presentan naturales 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 esta velocidad. Sin embargo existe una correlación de cada equipo entre lo que mide y el estado del pavimento.

4.3 Evolución del coeficiente de resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento de un pavimento recién ejecutado es, en general, muy elevada. Con superficie seca se conserva prácticamente constante bajo la acción del tránsito, mientras que en superficie mojada la resistencia es afectada por el flujo vehicular.



Figura 15. Mu-meter de Aeropuertos y Servicios Auxiliares.

Como prueba de lo anterior, se puede considerar la evolución que ha tenido la resistencia al deslizamiento sobre superficies mojadas en los pavimentos de varios países en tramos de ensayo, las medidas se realizan con el péndulo de fricción. Los altos valores iniciales del coeficiente de resistencia al deslizamiento disminuyen rápidamente durante los primeros tres meses; a partir de entonces los valores obtenidos oscilan respecto a un valor medio, que se supera durante el invierno, mientras que desciende debajo de la media en verano. Es decir, existe una marcada variación estacional en la resistencia al deslizamiento. Esta variación

se presenta en todos los tipos de pavimento (rígidos y flexibles) y se refleja en el número de accidentes que ocurren por deslizamientos en cada estación del año.

La variación de la resistencia al deslizamiento se debe a cambios en las propiedades de la superficie producidos por el tránsito y los agentes meteorológicos, en especial al pulido de los agregados del pavimento. Este se produce por el paso de los neumáticos de los vehículos, por lo que el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento varía dentro de una misma sección transversal. Así, en el borde interior, los coeficientes de resistencia al deslizamiento, en general, conservan casi los mismos valores iniciales, mientras que disminuyen en forma importante en las rodadas.

4.4 Índice de Fricción Internacional (IFI)

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 (A.I.P.C.R.) propuso un experimento, 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, altos y bajos de 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 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 repetibilidad 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.

Se evaluaron un total de 54 tramos, utilizando 38 diversos equipos de medición, tales como el Péndulo de fricción, el Círculo de arena, Mu-meter, SCRIM y el perfilómetro láser entre otros. El experimento concluyó con la elaboración de una escala universal de fricción denominada Índice de Fricción Internacional (IFI). El IFI viene indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma; el primero se deriva de la medida de la fricción y el segundo de la macrotextura (textura). El primero es un número adimensional; el valor cero de la fricción indica un deslizamiento perfecto y el valor uno, la adherencia y el segundo es un número positivo, sin límites determinados y unidades de velocidad (km/hr).

El IFI se expresa de la siguiente forma:

$$\text{IFI (F60, S}_p\text{)} \quad (1)$$

donde:

F(60) es la fricción a 60 km/hr.

S_p es la constante de la velocidad de referencia y representa la macrotextura.

$$\text{F60} = A + (B * \text{FR60}) \quad (2)$$

$$\text{S}_p = a + (b * \text{Tx}) \quad (3)$$

A, B, a y b son valores que se encuentran en tablas de la Referencia 4, de acuerdo con método o equipo utilizado para realizar la evaluación sobre la carretera.

Tx es la medida de la macrotextura con un método o equipo determinado.

$$FR60 = FRS * e^{(S - 60/S_p)} \quad (4)$$

FRS es el valor de la fricción con un equipo a cierta velocidad.

S es la velocidad del equipo durante el ensayo.

Este par de números que definen el IFI sirve para cualquier aplicación relativa a la resistencia al deslizamiento, como estudios de accidentes, inspecciones para la gestión de la conservación de carreteras, evaluación de pistas de aeropuertos, etc.

El Índice de Fricción Internacional, según la Referencia 2, es una escala de referencia basada en el Modelo AIPCR (que relaciona la fricción con la velocidad de desplazamiento), modelo que sirve para estimar la constante de referencia de velocidad (S_p) y de la fricción a 60 km/hr (F60) de un pavimento. El par de valores (F60 y S_p) expresan el IFI de un pavimento y permiten calcular el valor de fricción, F(S), a cualquier velocidad de deslizamiento S mediante la ecuación:

$$F(S) = F60 * e^{(S - 60) / S_p} \quad (5)$$

Las curvas obtenidas 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:

$$GF(S) = GF60 * e^{(60 - S) / G_S} \quad (6)$$

donde:

- GF(S) es la fricción en la Curva de Referencia.
- GF60 es el valor de la fricción en la Curva de Referencia, correspondiente a la velocidad de desplazamiento de 60 km/hr.
- S es la velocidad del equipo durante el ensayo.
- GS es la constante que representa la influencia de la velocidad en la Curva de Referencia.

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.

Por lo anterior expuesto, se recomienda que el Sector Comunicaciones y Transportes contemple en su normatividad correspondiente los valores mínimos del Índice de Fricción Internacional en especial en las nuevas autopistas concesionadas y con el tiempo, analizar su aplicación en la red federal troncal de carreteras (principalmente en los corredores de transporte).

5. MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL (RUGOSIDAD)

La regularidad superficial es una característica que se valora midiendo la geometría de longitudes de onda comprendidas entre 0.5 metros y 50 m. Constituye uno de los parámetros más significativos para valorar el estado del pavimento, atendiendo a los aspectos de: confort del usuario, consumo de combustibles, desgaste del vehículo, efectos en las mercancías transportadas, etc.

Cada tipo de irregularidad está relacionado con diversos efectos no deseados; así, por ejemplo, las ondas cortas y medias con amplitudes elevadas pueden ocasionar la pérdida de contacto entre el pavimento y la rueda, reducir la maniobrabilidad del vehículo (incluso en superficie seca), aumentar el consumo de combustible, etc.

En México, para evaluar las características superficiales de la mayoría de los tramos de la red de carreteras, se ha empleado el Índice de Servicio Actual (ISA). Este procedimiento, basado en los estudios realizados por la American Association of State Highway Officials (AASHO), consiste en calificar la calidad de la superficie de la carretera que el usuario percibe al transitar a la velocidad de operación (de manera subjetiva). La escala del ISA es de 0 a 5, correspondientes a una superficie intransitable y a una superficie perfecta respectivamente. Este índice es de gran utilidad para tener una idea de las condiciones generales de un camino y es recomendado cuando no se tienen equipos automatizados para evaluar y medir la rugosidad de una carretera.

Existen en el mundo una gran variedad de equipos de medición de la rugosidad, de diversos costos, rendimientos, y sistemas de adquisición de datos; cada uno de estos equipos tiene una escala de medición propia que permiten, mediante un valor, medir la rugosidad de un camino. Debe de existir una relación entre el valor obtenido por cada equipo y las características superficiales del camino (rugosidad).

Un grupo de métodos de medida de la rugosidad está formado por los que utilizan referencias geométricas. En ellos, se registra el desplazamiento vertical de una rueda con respecto a una base horizontal de 3 a 10 m de longitud. Los equipos sencillos más conocidos son las reglas móviles de 3 metros (Figura 16), los perfilógrafos, el viógrafo, etc., que miden la regularidad en el sentido longitudinal de la carretera.



Figura 16. Vista parcial de la viga móvil de 3 metros.

Cada perfilógrafo registra, de manera particular, en forma gráfica, un perfil del camino detectado mediante una rueda registradora de acuerdo al arreglo de las ruedas, longitud y ancho de la viga. En estos equipos, generalmente, se expresa la calidad del camino mediante un valor denominado Índice de Perfil (IP), el cual se obtiene mediante la suma en valor absoluto de todas las irregularidades

(protuberancias y depresiones) que salen de una banda de tolerancia del perfil del camino (en mm, cm, in, etc.), dividido entre la distancia recorrida por el perfilógrafo (en km, millas, etc.). El Índice de Perfil se expresa en unidades de cm/km, in/milla, etc. En la Figura 17, se observa el perfilógrafo de Hveem diseñado por el Departamento de Carreteras de California; este tipo de equipo es utilizado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) para determinar el Índice de Perfil de pistas, plataformas y zonas de rodaje en los aeropuertos mexicanos. Actualmente se empieza a utilizar para control de calidad en tramos de carreteras nuevas como parámetro de pago.

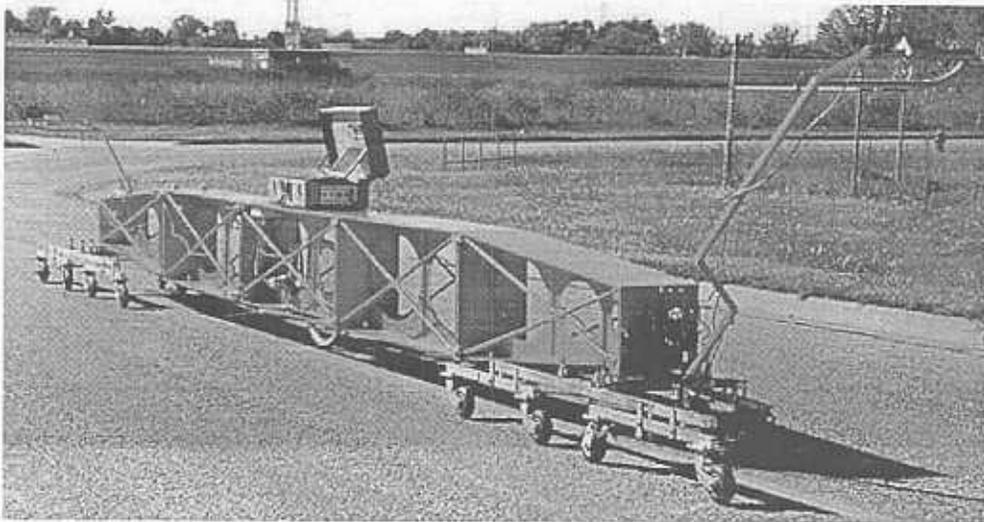
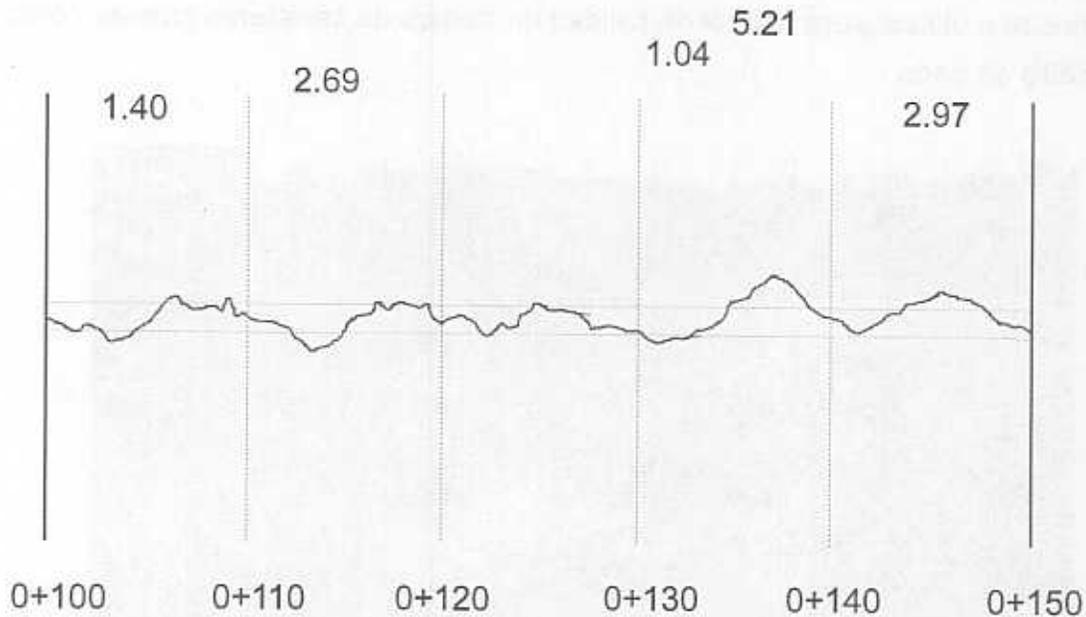


Figura 17. Perfilógrafo de California.

En la Figura 18, se muestra un registro obtenido mediante el perfilógrafo de California, tiene en la escala vertical una relación de 1:1 y en la horizontal 1:300. El ancho de la barra de tolerancia es de 5.2 mm (aprox. 0.2 in). La suma de irregularidades fuera de la zona de tolerancia es de 13.31 mm en una distancia de 50 m, extrapolando a un kilómetro se obtiene el $IP = 266 \text{ mm/km}$ (17 in/milla) para ese tramo. En la práctica es común expresar el Índice de Perfil en unidades inglesas, por lo que para este caso sería $IP = 17$.

Los perfilógrafos tienen una aplicación específica en la detección de irregularidades puntuales en la fase de control de obra. El Índice de Perfil obtenido por estos equipos ha servido como forma de pago en tramos nuevos de

aeropuertos, carreteras y autopistas. No se recomienda su uso en grandes longitudes debido a que presentan como desventaja fundamental su bajo rendimiento (aproximadamente 2 - 4 km/hr). El Índice de Perfil y el Índice Internacional de Rugosidad aunque tiene unidades similares (m/km, mm/m, in/milla, etc.) son parámetros diferentes; sin embargo, existe una correlación entre ambos para cada equipo.



Suma de irregularidades = $1.4+2.69+1.04+5.21+2.97+ = 13.31$ mm

Distancia = 50 m (0.05 km)

IP = $13.31 / 0.05 = 266$ mm/km (17 in/milla)

Figura 18. Registro gráfico de un perfilógrafo de California.

Los denominados transversoperfilógrafos (ver Figura 19), son perfilógrafos que se utilizan para medir la regularidad en el sentido perpendicular al eje de la carretera, detectando la presencia de roderas en pavimentos flexibles, irregularidades, falta de bombeo, etc.



Figura 19. Perfilógrafo transversal utilizado por la Dirección General de Servicios Técnicos (SCT).

En un segundo grupo de equipos de medición se encuentran los de tipo dinámico, con los que se pueden conseguir altos rendimientos y que, por tanto, pueden aplicarse incluso para la evaluación del estado superficial de toda una red de caminos. Estos equipos miden los desplazamientos de una rueda o de un eje mediante un sistema mecánico (normalmente, éste tiene un único grado de libertad), a una cierta velocidad de operación. Estos desplazamientos son provocados por las irregularidades existentes en un camino al sistema integral del equipo, lo que significa que la medición obtenida es función de las características dinámicas del sistema de suspensión del vehículo o remolque en que está montado (peso del vehículo, amortiguadores, resortes, neumáticos etc.).

Se pueden citar entre estos rugosímetros, el equipo francés llamado Analizador Dinámico del Perfil Longitudinal (APL), el español Analizador de la Regularidad Superficial (ARS) y el americano Mays Ride Meter (Figura 20), que se utiliza en nuestro país. Todos ellos se caracterizan por desplazarse a velocidades de operación en las carreteras, permitiendo no interferir con el flujo vehicular; las velocidades de ensayo van desde 20 hasta 80 km/hr.



Figura 20. Mays Ride Meter.

Actualmente existen varios equipos de medición de la rugosidad de tipo dinámico, de diversos modelos, costos, características, sistemas de adquisición de datos y velocidades de operación. Cada uno de estos equipos mide la calidad de una superficie con una escala de medición propia; además, entre los mismos equipos difiere el valor de la calificación para un mismo tramo debido a las características de cada vehículo: antigüedad, uso, modificaciones, reparaciones, etc. Por ello, con la correlación de todos estos equipos referenciados al Índice Internacional de Rugosidad, permite obtener un solo parámetro de medición para conocer el estado actual de un tramo específico de manera cuantitativa, independientemente del equipo utilizado.

Un tercer grupo, cubre los equipos de medición integral para obtener las características superficiales del pavimento y son capaces de elevados rendimientos (velocidades superiores a los 70 km/hr). Los más conocidos son: el ARAN canadiense y el RST (Road Surface Tester) sueco (ver Figura 21). El sistema de medición de estos equipos consta de una serie de cámaras láser situadas en la parte delantera de una camioneta, lo que permite conocer a detalle el perfil real del camino y determinar al mismo tiempo el Índice Internacional de Rugosidad mediante un programa de cálculo. Se pueden medir, simultánea o independientemente, las siguientes características: profundidad de roderas,

rugosidad, macrotextura, fisuración de la superficie, perfiles transversales y radios de curvatura y, opcionalmente, resistencia al deslizamiento.

Independientemente del equipo empleado, los resultados de las medidas deben servir para establecer un índice de la rugosidad del tramo o carretera en estudio, obteniéndose un valor para cada kilómetro auscultado.



Figura 21. Equipo RST (Road Surface Tester) sueco.

La construcción de un pavimento bueno y con rugosidad adecuada es de interés público y se comporta mejor que uno construido con perfil inicial rugoso (Referencia 11). Esto se puede observar utilizando los procedimientos de diseño y comportamiento de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). La American Society of Civil Engineers (ASCE) promueve la utilización de incentivos para disminuir la rugosidad de los pavimentos que a la vez, mejoran la calidad, desarrollan la sensibilidad hacia el trabajo en grupo y recompensan la excelencia.

De esta manera la medición de la rugosidad sirve como un parámetro de control de calidad en obras nuevas, llegándose a ofrecer estímulos económicos cuando se alcanzan valores superiores a los especificados en el contrato de obra o a

sancionar en caso contrario. En la Tabla 2, se observan los porcentajes de pago recomendados para caminos con velocidades superiores de 72 km/hr, para los diferentes valores de Índice de perfil obtenidos.

Índice de Perfil		IRI (m/km) estimado	Porcentaje de pago	Porcentaje de pago
cm/km	in/milla		sugeridos por AASHTO	sugeridos por ASCE
< 4.8	<3	1.1	105	110
4.8 - 6.3	3 - 4		104	108
6.3 - 7.9	4 - 5		103	106
7.9 - 9.5	5 - 6		102	104
9.5 - 11.1	6 - 7		101	102
11.1 - 15.8	7 - 10	1.4	100	100
15.8 - 17.4	10 - 11		98	98
17.4 - 19.0	11 - 12		96	96
19.0 - 20.6	12 - 13		94	94
20.6 - 22.2	13 - 14		92	92
22.2 - 23.8	14 - 15		90	90
> 23.8	>15	1.7	Trabajo correctivo	Trabajo correctivo

Tabla 2. Porcentajes de pago sugeridos por AASHTO y ASCE para diferentes Índices de Perfil obtenidos en un pavimento nuevo (Ref. 11).

Para carreteras en servicio, la medición de la rugosidad es una herramienta para evaluar el comportamiento superficial de un tramo a través del tiempo y permite fijar niveles o umbrales de alerta para proceder a una revisión de daños o para programar labores de mantenimiento de acuerdo a la importancia del camino.

En la actualidad, a fin de estandarizar las medidas de rugosidad realizadas con equipos diferentes, el Banco Mundial está sugiriendo el empleo del Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index, IRI), a partir de estudios patrocinados por ellos mismos. Se define como la relación entre el desplazamiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo y su distancia recorrida. Se expresa en milímetros por metro, en metros por kilómetro, en pulgadas por milla, etc. Valores inferiores a 2 m/km representan una excelente rugosidad para todo tipo de camino (ver Figura 22).

La forma de obtener el IRI es mediante el levantamiento topográfico del perfil longitudinal del camino a un cierto intervalo de mediciones (25 ó 50 cm), las cotas obtenidas se introducen en el programa de cálculo del IRI realizado por el Banco Mundial, que simula los movimientos del modelo "cuarto de carro" sobre el perfil. Este procedimiento se realiza exclusivamente para obtener el IRI de un tramo, regularmente no mayor a 600 m, que sirve para calibrar los diferentes equipos de evaluación de rugosidad y expresarlos en una escala patrón.

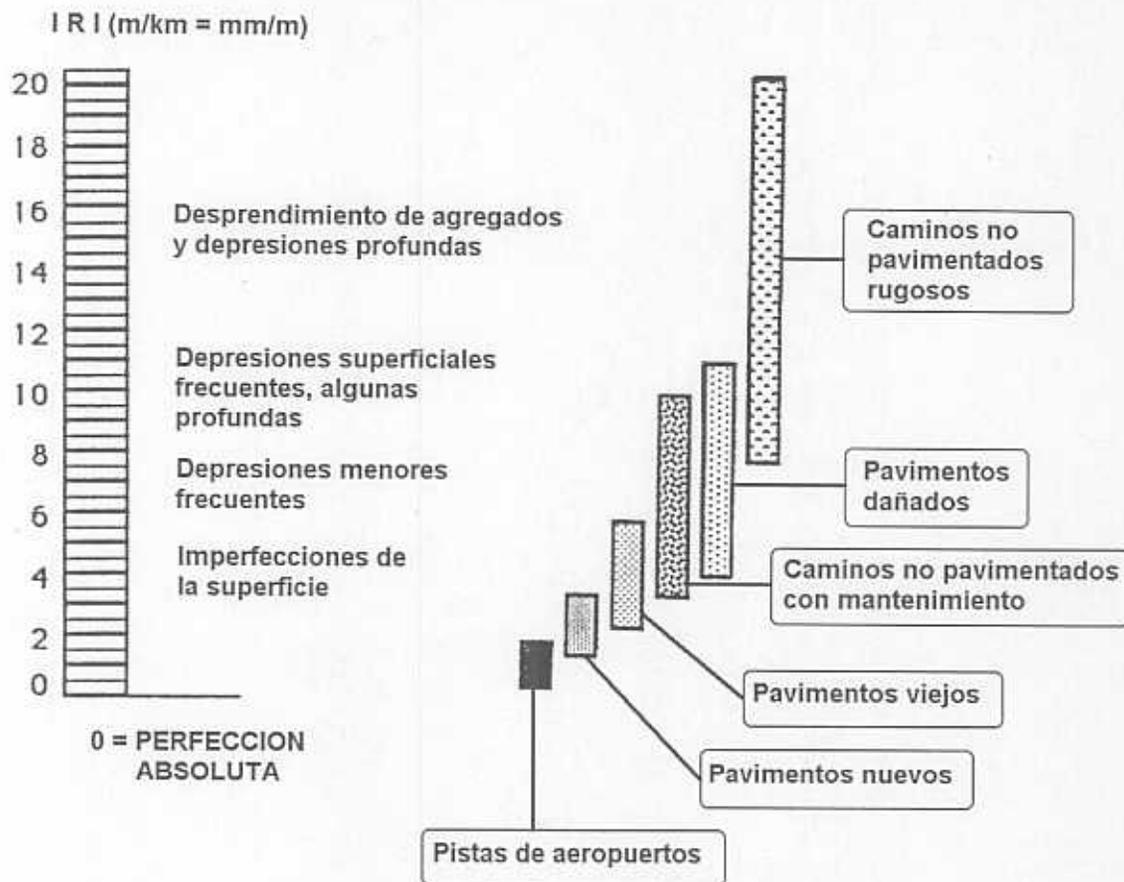


Figura 22. Escala del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) según el Banco Mundial (Ref. 3).

La figura 4 muestra el resultado de la clasificación de los pavimentos en función de su estado de conservación. Se puede observar que el 45% de los pavimentos se encuentran en un estado de conservación bueno, el 30% en un estado de conservación regular, el 15% en un estado de conservación deficiente y el 10% en un estado de conservación muy deficiente.



Figura 4. Distribución de los pavimentos en función de su estado de conservación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La capa de rodamiento, por su posición dentro del pavimento, es la que soporta directamente el paso del tráfico y los efectos del medio ambiente, y por esta razón se le exigen características específicas que no tienen porqué cumplir el resto de las capas. Su duración depende del proyecto inicial, de los materiales utilizados, de la calidad de construcción, del desgaste o deterioro ejercido por el tránsito y factores climáticos, entre otros.
- El estado superficial de una carretera definitivamente influye en el confort y en la seguridad de los usuarios y principalmente incide en los costos de operación de los vehículos, vital es para la eficiencia global del transporte. Es importante evaluar las condiciones superficiales, mediante el monitoreo periódico y permanente de las autopistas y de la red principal de carreteras, con los equipos y métodos adecuados.
- Existen múltiples factores que influyen en la seguridad al transitar por una carretera; de entre ellos, uno muy importante se refiere al punto de contacto vehículo y carretera. Las características superficiales de los pavimentos tanto rígidos como flexibles, deben reunir ciertas características que minimicen que sea el estado del pavimento una de las causas de accidentes.
- Como producto de numerosos estudios, la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (A.I.P.C.R.), ha adoptado una clasificación de las diferentes características de la superficie de la carretera según las distintas escalas geométricas del pavimento, que influyen en el funcionamiento vehículo-carretera.
- Se ha encontrado que la microtextura influye en el riesgo de accidentes por derrapamiento a cualquier velocidad y en el desgaste de los neumáticos de los vehículos que circulan. La macrotextura está relacionada directamente con el drenaje superficial del pavimento y la proyección de agua de los vehículos durante y después de la lluvia. Mientras que la megatextura y la regularidad

superficial tienen influencia en la comodidad, cargas dinámicas, desgaste, estabilidad del vehículo y en los costos de operación del transporte.

- Las características superficiales originales de un pavimento disminuyen con el transcurso del tiempo; se va produciendo el pulimento de los agregados modificándose sensiblemente la microtextura. También la macrotextura disminuye paulatinamente, dificultando la evacuación de la película de agua procedente de lluvia hasta que, por debajo de un determinado umbral, el drenaje está limitado, casi exclusivamente, al dibujo del neumático, por lo que la capa de rodamiento de un pavimento debe tener un mantenimiento adecuado, para que se encuentre en condiciones aceptables de circulación durante la vida útil de la carretera.
- Existe una marcada variación estacional de la resistencia al 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 y desgastados en superficies secas. Si el pavimento está mojado, la situación es totalmente diferente al caso anterior, apreciándose una fuerte disminución en la resistencia al derrapamiento con la velocidad. Esta pérdida, aunque mayor cuanto más gruesa sea la película de agua, hace que la conducción sea más peligrosa. También el estado del neumático influye de manera apreciable en la adherencia en un pavimento mojado y en la distancia de frenado de cualquier vehículo, por lo que se requiere mayor atención en las autopistas y en los tramos de la red nacional carretera que tengan precipitaciones frecuentes y con velocidades de operación altas, así como con fuertes volúmenes de tránsito vehicular.
- La medición de la rugosidad sirve como un importante parámetro de control de calidad en obras nuevas, llegándose a ofrecer estímulos económicos cuando se alcanzan valores superiores a los especificados en el contrato de obra o a sancionar en caso contrario. Estos incentivos financieros permiten disminuir la rugosidad inicial, mejorar la calidad y el comportamiento de un pavimento, y

recompensar al contratista por un buen trabajo realizado. Para carreteras en operación, la medición de la rugosidad es una herramienta vital para evaluar el comportamiento superficial de un tramo a través del tiempo y permite fijar niveles o umbrales de alerta para proceder a una revisión de daños o para programar labores de mantenimiento de acuerdo a la importancia del camino.

- Existe un parámetro denominado Índice de Fricción Internacional (IFI), el cual permite referir a una escala las condiciones de textura y fricción de un pavimento, medido con cualquier tipo de equipo o método. Actualmente este índice está en estudio en diversos países para su posible implantación.
- Se concluye con este trabajo que sería altamente recomendable incluir dentro de la Normativa del Sector Comunicaciones y Transportes, especificaciones o recomendaciones de la rugosidad, textura y resistencia al derrapamiento de los pavimentos, tanto rígidos como flexibles, de las principales carreteras de la red. En el caso de pavimentos para aeropuertos, sí es obligatorio cumplir con normas mínimas del coeficiente de fricción, tanto en condiciones de pavimentos secos, como en pavimentos mojados, por razones de cumplimiento con las normas internacional, lo mismos para la regularidad superficial para pistas, zonas de rodaje y plataformas. Para el caso de las carreteras se recomienda contar con especificaciones para la red de autopistas en México, que alcanzan a la fecha los 6,000 kilómetros y con el tiempo, analizar su aplicación en la red federal troncal en los principales corredores de transporte.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos, para lo cual se han desarrollado una serie de procedimientos que permiten evaluar el estado de conservación de la superficie de los pavimentos, tanto en términos de su resistencia estructural como de su comportamiento funcional. Para ello se han considerado los aspectos más relevantes de la mecánica de suelos y de la mecánica de estructuras, así como los aspectos más relevantes de la mecánica de fluidos y de la mecánica de sólidos.

En primer lugar se ha considerado el diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos, para lo cual se han desarrollado una serie de procedimientos que permiten evaluar el estado de conservación de la superficie de los pavimentos, tanto en términos de su resistencia estructural como de su comportamiento funcional. Para ello se han considerado los aspectos más relevantes de la mecánica de suelos y de la mecánica de estructuras, así como los aspectos más relevantes de la mecánica de fluidos y de la mecánica de sólidos.

En segundo lugar se ha considerado el diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos, para lo cual se han desarrollado una serie de procedimientos que permiten evaluar el estado de conservación de la superficie de los pavimentos, tanto en términos de su resistencia estructural como de su comportamiento funcional. Para ello se han considerado los aspectos más relevantes de la mecánica de suelos y de la mecánica de estructuras, así como los aspectos más relevantes de la mecánica de fluidos y de la mecánica de sólidos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas
Rodolfo Téllez G.
Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica 21
Sanfandila, Qro., México, 1991.
- 2.- El Índice de Fricción Internacional
Francisco Achutegui V., Ramón Crespo R., Barlomé Sánchez L., Ignacio Sánchez
Revista Rutas
Madrid, España, Marzo-Abril 1996.
- 3.- Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurement
Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, César A. V. Queiroz
Banco Mundial. Technical Paper 45
1986.
- 4.- Experimento Internacional AIPCR de comparación y armonización de las
medidas de textura y resistencia al deslizamiento.
Publicación AIPCR-01-04.T-1995.
- 5.- Firms
Carlos Kraemer H., Miguel A. del Val
Escuela Politécnica de Madrid
Madrid, España, 1990.
- 6.- Design Guide for Road Surface Dressing
J. C. Nicholls
Transport Research Laboratory
England, 1996.

7.- La adherencia neumático-pavimento

Revista Carreteras

Juan F. Viguera G., José M. Garagorri Y., Ramón Crespo R.
Argentina, noviembre 1997.

8.- Conservación

Angel Lacleta M., Carlos Kraemer H.

VIII Curso Internacional de Carreteras

Madrid, España, junio de 1992.

9.- Development of Reduce Specification for Surfacing Aggregate on Low Traffic Roads in Botswana

Martin E. Woodbridge

Transport Research Laboratory

England, 1995.

10.- Effect of initial pavement smoothness on future smoothness and pavement life

D. K. Smith, T. E. Hoerner and M. I. Darter

Pavement Research Issues

Transportation Research Record (TRB) No. 1570

Washington, D.C., USA, 1997.

11.- Caminos y calles de bajo tránsito

American Society of Civil Engineers and Federal Highway Administration

USA, noviembre de 1992.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues-Galindo
76700 P. Escobedo, Qro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71
Internet <http://www.imt.mx>