

Capítulo I: INTRODUCCIÓN.

1.1. ANTECEDENTES.

Toda obra de ingeniería, aún antes de ser terminada, requiere una atención constante de conservación. Naturalmente, las carreteras no son una excepción, ya que por sus características especiales quedan expuestas a los ataques permanentes de los agentes naturales y al efecto de las cargas que soportan sus elementos estructurales. Por esto, es indispensable someterlas a una vigilancia continua y concederles especial atención, a fin de mantenerlas en las mejores condiciones de servicio. Puede asegurarse que los trabajos de conservación de una carretera deben preverse desde que se efectúa su localización, ya que entre varias alternativas de ruta, equivalentes en otros aspectos, debe elegirse aquella que ofrezca la mayor seguridad y ventajas para su futuro mantenimiento, aún cuando el costo inicial no sea precisamente el menor. El estado en que se encuentran los caminos, y en particular sus pavimentos, influye en forma decisiva en los costos de operación, que incluyen el desgaste y consumo de combustibles propios de los vehículos y su natural influencia en los precios de los artículos que se transportan; pero, sobre todo, en la seguridad, comodidad y tiempo de los usuarios.

En cuanto a las labores de conservación en las carreteras mexicanas, puede decirse que han tenido más o menos la misma evolución que las que se refieren a la construcción de estas obras, o sea, siempre con franca tendencia a mejorar. Sin embargo, en este aspecto, ha sido más lento y menos efectivo el

proceso para implantar las nuevas técnicas que se requieren para enfrentar con eficiencia los problemas derivados del rápido crecimiento de la red de caminos y del tránsito, tanto en volumen como en peso de cargas por eje y número de ejes; en todo lo anterior ha influido seguramente la falta de recursos suficientes y oportunos. Además de esto último, los problemas que todavía en la actualidad afectan el buen mantenimiento de los pavimentos, y en particular a los de las carreteras troncales, son principalmente los siguientes:

- La inadecuada oportunidad en la ejecución de los trabajos, los cuales se hacen con frecuencia en época de lluvias o cuando los pavimentos se encuentran muy deteriorados.
- El empleo de materiales pétreos de baja calidad o de productos asfálticos inadecuados.
- La utilización de procedimientos constructivos obsoletos, como la elaboración de mezclas asfálticas en el lugar, con motoconformadora y rebajado asfáltico FR-3, lo cual produce carpetas asfálticas de baja calidad, mal comportamiento, alto costo y desperdicio de recursos no renovables, que implica el uso de solventes derivados de gasolina. También se tienen otros defectos con este sistema de mezcla en el lugar, como son: exposición al medio ambiente durante su elaboración, con la consiguiente afectación de la mezcla y la inducción de contaminantes no controlables, interferencias al tránsito, etc.

Independientemente del método utilizado, la influencia del costo de operación y, en menor grado, el de conservación, juegan un papel económico muchísimo más importante que el costo de construcción inicial. Se refuerza el criterio que señala un mejor comportamiento y mucho menores costos globales de los pavimentos muy bien construidos para una situación presente, que sean capaces de afrontar el desarrollo futuro por intervenciones de refuerzo hacia

arriba, en adición a lo antes hecho, en comparación a secciones débiles no útiles para la aplicación de esas políticas y necesitadas de frecuentes reconstrucciones.

Este trabajo resalta la dificultad que existe al tratar de comparar métodos de diseño entre sí. A falta de una teoría científica sobre el comportamiento de los pavimentos, la validación de un método de diseño sólo se puede realizar a partir de la observación empírica del funcionamiento del pavimento a largo plazo.

Debe reconocerse que los pavimentos que México necesita en sus carreteras no son hoy los mismos que fueron en otras épocas. Circunscribiendo las ideas a la red nacional pavimentada, tal como es el objetivo del presente trabajo, debe aceptarse un muy importante cambio de circunstancias entre el momento actual y las épocas en que las carreteras mexicanas empezaron a ser construidas y que en buena parte se desarrollaron.

La red nacional comenzó a formarse a partir de la época 1920-1930 y creció a un ritmo relativamente moderado, hasta 1950. Entre 1950 y 1970, la red fue objeto de un desarrollo muy importante y a partir de 1980 continuó creciendo significativamente, pero probablemente con un gradiente menor, si bien en los últimos años (en el período 1990-1995) tuvo lugar la incorporación de una red de modernas autopistas (FyR 9).

En el desarrollo de la red son discernibles tres etapas relativamente bien diferenciadas. En un principio, la motivación fundamental de la planeación, fue conscientemente o por mandato inapelable de la realidad nacional, la integración sociopolítica de la nación. Se construyeron los enlaces carreteros que unen la capital nacional con las capitales estatales; después, estas últimas con las principales ciudades de sus estados y con otras capitales estatales y, finalmente, se comunicaron todas esas localidades con la totalidad de las ciudades importantes del país. De esta manera se logró una integración

nacional que garantizó la unidad económica, social y política, a la vez que se lograron las condiciones necesarias para la integración, defensa y homogeneización de la nación.

A esta etapa siguió otra, en la que se reconoció que la red anterior, que podría considerarse como la red principal y básica, tendría que ser complementada por una red alimentadora de carácter en gran parte rural y capilar, a fin de lograr un movimiento general más eficiente y de mayor penetración en todo el territorio nacional. De ésta manera nació un muy importante número de caminos rurales y secundarios, pavimentados, empedrados, etc., siempre con el requisito de garantizar el tránsito en toda época del año. Esta red complementaria, que deberá expandirse constantemente en el futuro, no será contemplada en su mayor parte en este trabajo, que se refiere únicamente a carreteras pavimentadas con pavimentos asfálticos, que corresponden más bien a la red básica estatal y federal.

A la segunda etapa arriba descrita siguió lo que podría considerarse como una tercera, en donde el énfasis principal de la construcción se puso en carreteras muy modernas de altas especificaciones, frecuentemente de cuatro y más carriles. En esta etapa se desarrollaron también nuevas formas de financiamiento, responsabilidad y cuidado en conservación y operación, así como se convirtió en rutinaria una política ya bien conocida en el país, de peajes y sistemas para transferir al usuario los costos del programa.

No hay que decir que la delimitación de las tres etapas atrás mencionadas no ocurrió ni ocurre en forma tajante. A lo largo de toda la historia reciente de México ha continuado la construcción de carreteras de carácter más tradicional, de tránsito libre y dos carriles, así como caminos alimentadores o, inclusive, autopistas modernas, algunas de las cuales tienen en el México actual antigüedades muy grandes. Lo que distingue a las etapas anteriores en todo caso es un cierto énfasis que sí parece estar presente.

Es de esperar que en el futuro una parte importante del esfuerzo constructivo nacional en el área carretera se dirija principalmente a lograr el tránsito expedito y rápido de bienes y mercancías, con la decidida meta de abatir, en todo lo que vaya resultando posible, los costos operativos del transporte nacional; para respaldar el desarrollo económico y la generación y distribución de productos, de riquezas y oportunidades por todas partes. Independientemente de estas metas, parece evidente que habrá de continuar el desarrollo de la red alimentadora que, como se mencionó, no será el objetivo principal de este trabajo.

Obviamente, muchos de los cambios anteriores fueron debidos a y a la vez produjeron, lo que podría considerarse un cambio muy importante en el transporte nacional y sus características. En todos esos años, la nación experimentó una transformación económica y estructural muy significativa, que fue haciendo aparecer una infraestructura industrial creciente, hasta alcanzar niveles importantes, de manera que una economía relativamente doméstica se fue convirtiendo en una economía necesitada de recurrir a la exportación de bienes para poder seguir su desarrollo. Lo anterior equivale a decir que el transporte como fenómeno económico fue adquiriendo una importancia cada vez mayor, de manera que podría decirse que una actividad, que hasta hace relativamente poco tiempo se centraba en comunicar, hoy se ha transformado en un quehacer mucho más complejo y que, además, se centra en la necesidad de comunicar en condiciones económicas competitivas y ello dentro de un mundo en donde toda la actividad del transporte evoluciona rápidamente, siempre con la vista fija en el logro de un transporte cada vez más barato, más rápido y más seguro. Un mercado internacional tan altamente competido como el que hoy existe resulta menos accesible si se llega a él con un transporte relativamente más costoso que el que puedan utilizar los competidores comerciales. De esta manera, el costo del transporte doméstico pasa a ser un eslabón fundamental en la cadena del comercio internacional.

Las transformaciones anteriores sucedieron al mismo tiempo que se iban desarrollando transformaciones no menos importantes en los vehículos carreteros utilizados. Si en 1950, el vehículo más pesado que recorría las carreteras nacionales podía llegar a 7 u 8 toneladas, en la actualidad es usual ver circular unidades cuyo peso bruto supera las 60. A la vez, esta multiplicación ocurrió no sólo en peso, sino también en número. Si en 1950, la carretera más importante de México podía tener 5 o 6 mil vehículos diarios, de los que un 10% eran camiones de carga; hoy es posible contemplar en la red básica mexicana carreteras con tres o cuatro veces mayor número de vehículos, además de que la proporción de vehículos de carga aumentó grandemente, hasta niveles de 30 o 40% del tránsito diario; en este sentido, México es uno de los países de mayor proporción de vehículos de carga dentro del flujo general (FyR 3).

Estos hechos, para los que no puede verse un futuro con tendencia a paliarlos, sino probablemente lo contrario, conducen a condiciones radicalmente nuevas y mucho más onerosas en lo que se refiere al comportamiento de los pavimentos. Condiciones que habrán de ser tomadas en cuenta en los diseños y en la construcción de las secciones estructurales de las carreteras que se construyan en el futuro, en los proyectos de refuerzo que se hacen para adaptar las carreteras existentes a las nuevas condiciones y en las tareas de conservación normal de todas.

La antigüedad de la red básica mexicana presenta, en efecto, hoy una situación que viene exigiendo y así seguirá, importantes inversiones para poner lo existente a tono con lo que exige el presente y exigirá el futuro.

Sería un orgullo para los planeadores, que antecedieron a los tiempos actuales, constatar que la red básica por ellos erigida con un criterio sociopolítico, sigue formando hoy parte muy conspicua de la red básica actual, aunque, este hecho

trae consigo una importante carga económica, pues hace que una fracción muy importante de la red básica de México sea también la más antigua, vale decir, la que se desarrolló en condiciones muy diferentes a las actuales.

Los vehículos de antaño ejercían sobre los pavimentos esfuerzos superficiales menores que los de hoy, puesto que los reglamentos al respecto han tenido que ir reconociendo la situación de facto del desarrollo de los vehículos de carga en dimensiones y peso bruto. A la vez, aquellos esfuerzos superficiales disminuían mucho más rápidamente con la profundidad, de manera que en un pavimento típico de entonces era relativamente exigida una capa superior de 30 o 40 cm de espesor (FyR 4). Los vehículos actuales, con esfuerzos mayores, duplican esta profundidad de influencia.

Como consecuencia de aquella situación, los pavimentos se construían frecuentemente, en México, con materiales que hoy no podemos sino considerar inadecuados y aún con ellos se cubrían pequeños espesores, bajo los cuales aparecían suelos naturales, generalmente producto de préstamo lateral en terrenos inmediatamente aledaños a la carretera en construcción. Los materiales eran frecuentemente tan endebles que se consideraba que el agua y sus efectos eran los enemigos de los ingenieros de caminos, pues convertía en altamente deformables las secciones estructurales. Efectivamente, las carreteras se deformaban y tenían baches, todo lo cual influía fatalmente en los costos de operación, pero la operación era escasa y se trataba de conseguir comunicación dentro de una economía nacional también relativamente de escaso nivel.

Obviamente, muchos de esos caminos tienen hoy funciones mucho menos conectadas con el transporte nacional más importante; pues en buena parte han sido substituidos por carreteras más modernas; en otros casos los caminos antiguos han sido reforzados estructuralmente y sólo hacia arriba y, en tal caso, presentan hoy un serio y recurrente problema de conservación, pues los

modernos camiones envían sus efectos a las capas profundas no modernizadas, haciendo poco durables los añadidos superiores.

El gran crecimiento del transporte nacional, en número y peso de los vehículos, presenta entonces nuevas condiciones, que han de ser tomadas en cuenta por los actuales diseñadores y constructores de pavimentos asfálticos.

Es en este panorama histórico y conceptual en el que se ha pensado que un trabajo como el presente pudiera tener utilidad, al expresar la realidad del ambiente en que se desarrolla la conservación de las carreteras existentes, los cambios que seguramente resultarán útiles y necesarios en la conceptualización de proyectos de nuevos pavimentos o de refuerzos y los métodos con que hoy se cuenta o que están en una etapa de desarrollo avanzado, para diseñar en detalle las secciones estructurales de las carreteras que han de soportar un transporte nacional que, sin duda, será siempre creciente.

En nuestro país, el transporte por carretera es el de mayor contribución a la actividad nacional, por lo que es necesario que el transporte opere con base en parámetros de eficiencia. Por la red de carreteras fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y el 98% del movimiento de pasajeros; además permite desarrollar los aspectos comercial, social e industrial (FyR 10).

Para preservar esta red de carreteras es importante contar con un programa de mantenimiento, acorde con las necesidades y presupuestos. La información que se requiere para preparar un programa de conservación es sólo una parte de toda la información que se puede medir en un camino, por lo que se debe "tamizar" constantemente para obtener sólo aquellos datos que realmente influyan en las decisiones para el mantenimiento de la red o para la elaboración de un proyecto detallado de rehabilitación de un tramo específico.

Se han realizado estudios para conocer cuáles son los factores de un camino que influyen de manera directa en los costos de operación de los vehículos, principalmente de los de carga, resultando que uno de los principales es el estado superficial.

Los principales costos de operación son los siguientes:

- Combustibles.
- Lubricantes.
- Llantas.
- Reparación y refacciones.
- Costos del operador.
- Depreciación y reposición de vehículos.
- Intereses.
- Seguros.
- Tiempo de transporte de las mercancías.

La influencia de las condiciones del camino en los costos de operación de los vehículos es significativa. En condiciones óptimas de circulación, que se asocian con una carretera bien conservada, recta, en terreno plano y sin problemas de tránsito, el costo de operación es mínimo. La presencia de baches o deficiencias en la superficie; de pendientes o grados de curvatura no adecuados, así como de otros vehículos afecta las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes.

1.2. SITUACIÓN ACTUAL.

El problema principal de la red carretera nacional, especialmente en lo relativo a pavimentos y puentes, se encuentra en su conservación, rehabilitación y

modernización, ya que se está operando en gran parte de ella con índices de servicio actual bajos, cercanos al nivel de rechazo, produciéndose en consecuencia un importante incremento en el costo global del transporte. Esta situación, originada en forma principal por la falta de recursos suficientes y oportunos, es especialmente grave en la red troncal básica, por la que se mueve la mayor parte de la carga transportada. La mitad de dicha red, debe tener prioridad, porque es la que soporta el mayor volumen de tránsito y, por consiguiente, el proceso de deterioro es aún más rápido, sobre todo si se toma en cuenta también que los tramos incluidos en dicha longitud han rebasado su vida útil, principalmente en lo que se refiere a cargas de diseño.

Tomando en cuenta el constante aumento del número de vehículos y de sus velocidades y cargas, en México se han presentado, en términos generales, tres tipos principales de trabajo, para el mantenimiento de la red vial: conservación normal, rehabilitación o reconstrucción y, mejoramiento o modernización.

La conservación normal comprende los trabajos rutinarios y sistemáticos necesarios para mantener en buenas condiciones y en lo posible con las mismas características, todas las partes y elementos estructurales con los cuales se construyó la carretera, como son: la superficie de rodamiento, los acotamientos, el drenaje, los taludes, las zonas laterales y el señalamiento; en lo relativo a pavimentos, estos trabajos consisten, por lo común, en bacheos, taponamiento de grietas, renivelaciones, sobrecarpetas y riegos de sello. Por otra parte, la rehabilitación o reconstrucción incluye aquellas obras requeridas para reponer, totalmente o en alguna de sus partes, un tramo de carretera, sin alterar sus especificaciones geométricas o estructurales. Finalmente, en el mejoramiento o modernización se modifican las características geométricas y estructurales del camino, especialmente en lo concerniente a pavimentos y puentes, para aumentar su nivel de servicio y resolver los problemas originados por incrementos en el volumen de tránsito y en las cargas de los vehículos.

Siguiendo las ideas expuestas, el aspecto más importante al que hoy en día se enfrenta la rehabilitación o modernización de la red nacional, se refiere al manejo de los pavimentos, en el que se pretenden agrupar desde los métodos de auscultación, los criterios para la selección y el tratamiento de materiales, las normas que se utilizan para su caracterización, las soluciones de estructuración, los métodos de diseño de espesores, los procedimientos constructivos y los criterios o posibilidades de inversión. A este respecto, ya se ha creado un Sistema Mexicano de Administración de Pavimentos (SIMAP), estudiado y elaborado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Los sistemas de gestión deben tratar de que gran parte de las carreteras por las que pasa la mayor riqueza del país, se mantengan con una buena calidad de servicio, con base en programar su rehabilitación a tiempo y con recursos suficientes.

El papel preponderante que están asumiendo los programas de mantenimiento carretero, dentro de la administración de la infraestructura para el transporte, implica la necesidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan no solamente la ejecución de los trabajos de mantenimiento en forma eficaz y económica, sino también el manejo oportuno y fidedigno de un gran número de datos sobre la red.

El gran número de datos surge, por una parte, de la extensión de la red y por el deterioro en que se encuentra, y por la otra, de la obligación de aplicar eficazmente los recursos que se canalizan a la conservación.

En México existe la necesidad de diversos organismos encargados de la conservación de caminos, de contar con elementos que les permitan seleccionar las técnicas y equipos de evaluación de pavimentos más adecuados a sus necesidades específicas. Este estudio trata de la evaluación

de los pavimentos, incluyendo un método para generar alternativas de conservación para un proyecto carretero determinado, tomando en cuenta la aplicación de los Métodos de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), de la información de evaluación “no destructiva” y otros tipos de datos.

1.2.1. El Índice Internacional de Rugosidad, en la red nacional carretera.

La capa de rodadura de una carretera posee una serie de características técnicas y funcionales, obtenidas a partir de criterios y especificaciones de construcción. Su estado depende de la calidad inicial y del desgaste o deterioro producido por el tránsito y los factores climáticos, entre otros.

En el nivel de la red, partiendo de las mediciones de rugosidad de un camino, se puede definir el estado de los pavimentos mediante el índice de rugosidad; si se realiza un programa de evaluación anual en esos mismos caminos, se puede llegar a conocer el comportamiento del deterioro a través del tiempo.

En el comportamiento típico de la condición superficial con respecto al tiempo, se observa que a partir de un cierto nivel de rugosidad del camino, los factores que afectan al mismo son el tránsito, el medio ambiente, etc., que ocasionan la disminución de la calidad superficial. Esta disminución no es lineal sino que se puede dividir en tres etapas, de las que la primera tiene un deterioro poco significativo en los primeros años; la segunda presenta un deterioro más acusado que en la primera, y requiere comenzar a programar un mantenimiento para no dejar avanzar el deterioro, y la tercera significa una etapa de deterioro acelerado; ya que en pocos años el nivel de servicio cae en forma importante, con lo que va a llegar a un costo significativo de mantenimiento del camino y, como límite, puede ser necesaria una reconstrucción total del mismo.

Inicialmente, este trabajo describe brevemente los conceptos básicos de la administración de pavimentos y se ubica a la actividad de evaluación dentro del contexto de esta disciplina. A partir de este contexto, se define una serie de principios de la evaluación de los pavimentos y algunos criterios para realizarla. Posteriormente, se analizan los métodos y equipos más comunes empleados en la evaluación de los pavimentos. De estos métodos y equipos, se destacan las características más relevantes, las ventajas y desventajas del uso de algunos de ellos, así como los resultados que producen.

Los análisis desarrollados, consistieron en comparar entre sí la información de deflexiones obtenida con los equipos diferentes (evaluación no destructiva), que se utilizan en México. A partir de dichos resultados, se estableció un conjunto de relaciones, las cuales permiten precisar una serie de recomendaciones acerca de los ajustes que se pueden realizar a los métodos tradicionales.

Finalmente, se proponen alternativas para optimizar el método de conservación para un proyecto carretero determinado, tomando en cuenta la aplicación de los Métodos de la AASHTO y la información de evaluación "no destructiva" y otros tipos de datos.

Capítulo II: OBJETIVOS.

El nivel de servicio de la red federal de carreteras ha disminuido en los últimos años, ocasionando un incremento en los costos incurridos por los usuarios al transitarla y requiriéndose, cada vez, de mayores niveles de inversión para recuperar su nivel de servicio.

De acuerdo con el estudio de las causas que han originado el problema arriba mencionado, dentro de las cuales debemos destacar la falta de planeación, los bajos niveles de inversión, la ineficiente organización, el incremento en la demanda, la legislación inadecuada y las malas políticas de conservación, equipo y recursos, podemos definir las siguientes finalidades:

II.1. OBJETIVO GENERAL.

- El objetivo principal de este estudio, es establecer los elementos que permitan seleccionar las técnicas y los equipos de conservación de pavimentos, adecuados a las actividades específicas de los diversos organismos encargados de la conservación de los caminos en México.

II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Estandarizar los métodos para optimizar las estrategias de conservación de las superficies asfálticas de rodamiento en las carreteras.
- Proponer un procedimiento, para clasificar, jerarquizar y calendarizar los proyectos de conservación de las carpetas asfálticas de las carreteras, para así, conformar un plan de acción para el corto, mediano y largo plazo.
- Investigar detalladamente algunas de las técnicas para la evaluación y conservación de los pavimentos, y sus características particulares (potencialidades, limitaciones, costos, etc.).
- Analizar y comparar, los datos obtenidos con algunos de los métodos anteriormente usados en la red carretera federal.
- Ilustrar la utilización de la información anterior, comparando, los datos obtenidos con algunos de los métodos empleados en la red carretera federal.

Capítulo III: HIPÓTESIS.

Si se determinan los elementos que permiten seleccionar técnicas y equipos de conservación de pavimentos adecuados, de acuerdo con actividades específicas, entonces podremos, establecer métodos estandarizados para optimizar el diagnóstico de la superficie de rodamiento, los cuales deberán incluir un procedimiento para clasificar, jerarquizar y calendarizar (para el corto, mediano y largo plazo) los proyectos que contribuyan a este fin, para así, diseñar un plan de acción.

Capítulo IV: CONCEPTOS GENERALES.

En la República Mexicana, la mayoría de los caminos pavimentados son “pavimentos flexibles”, aunque también existen tramos en autopistas y en la red federal de carreteras conformados por “pavimentos rígidos”. Las características superficiales de ambos tipos de pavimentos deben reunir ciertas características que minimicen la intervención del estado del pavimento como 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 en combustibles, desgaste y reparación de partes mecánicas, consumo de neumáticos, etc.; o indirectos como tiempo de viaje, confort, etc.).

IV.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES.

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

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.

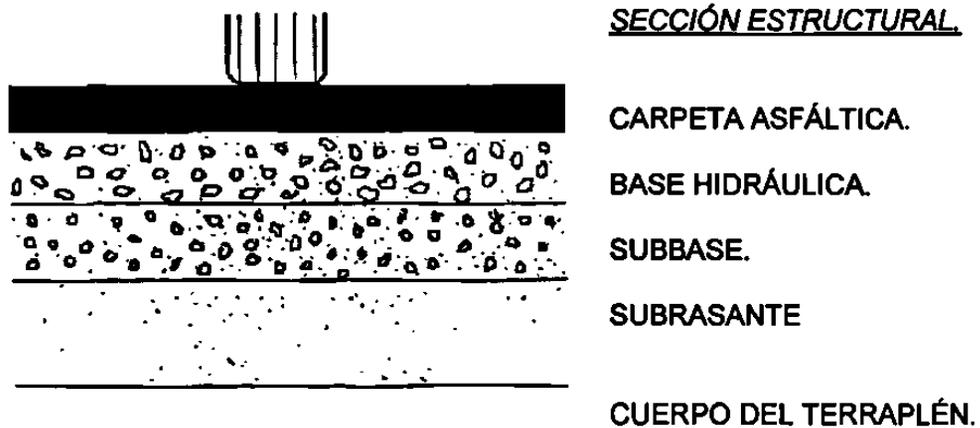


Figura 1. Conformación típica de un pavimento flexible.

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.).

IV.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS.

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 (ver fig. 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.

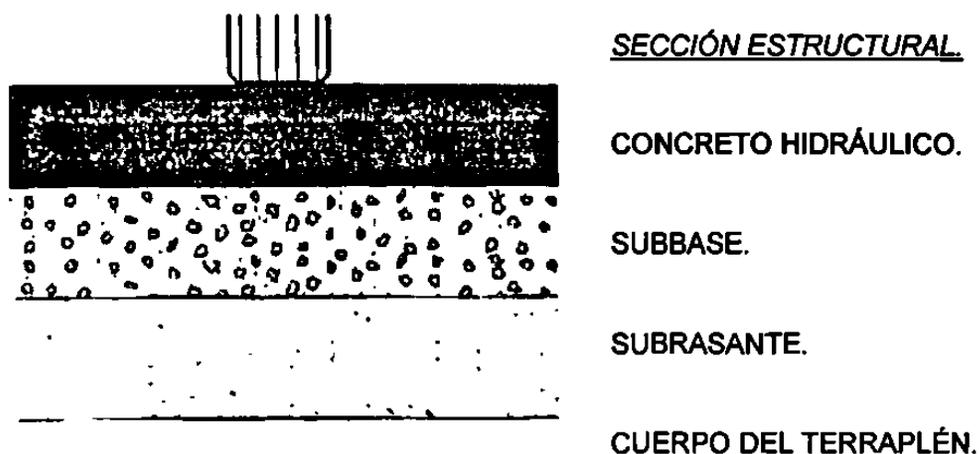


Figura 2. Conformación típica de un pavimento rígido.

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.

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.

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 período de servicio. En todo caso, las juntas deberían ser imperceptibles para los usuarios.

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.

IV.3. ÁREA DE CONTACTO, PRESIÓN 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:

- La forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento, el área de contacto y el reparto de las presiones sobre la misma.
- La velocidad de los vehículos y el tiempo de solicitación en un punto.
- La magnitud de las cargas, según la composición del tránsito (tipos de ejes que circulan).
- El 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 vehículo, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando el neumático 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 el pavimento y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la superficie de rodamiento 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 40 o 50% superiores a los normales, en 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, éstas 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.

IV.4. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES, INFLUENCIA EN LA INTERACCIÓN VEHÍCULO-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 (ver tabla 1).

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

NOMBRE		RANGO DE DIMENSIONES (APROX.)	
		HORIZONTAL	VERTICAL
Microtextura.		0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
Macrotextura.		0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
Megatextura.		50 - 500 mm	1 - 50 mm
Regularidad Superficial:	Ondas Cortas.	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
	Ondas Medianas.	5 - 15 m	5 - 50 mm
	Ondas Largas.	15 - 50 m	100 - 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. Además, se dispone actualmente de métodos de medida de las mismas, cuyos resultados han empezado a incorporarse a las especificaciones en otros países.

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 3, 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.

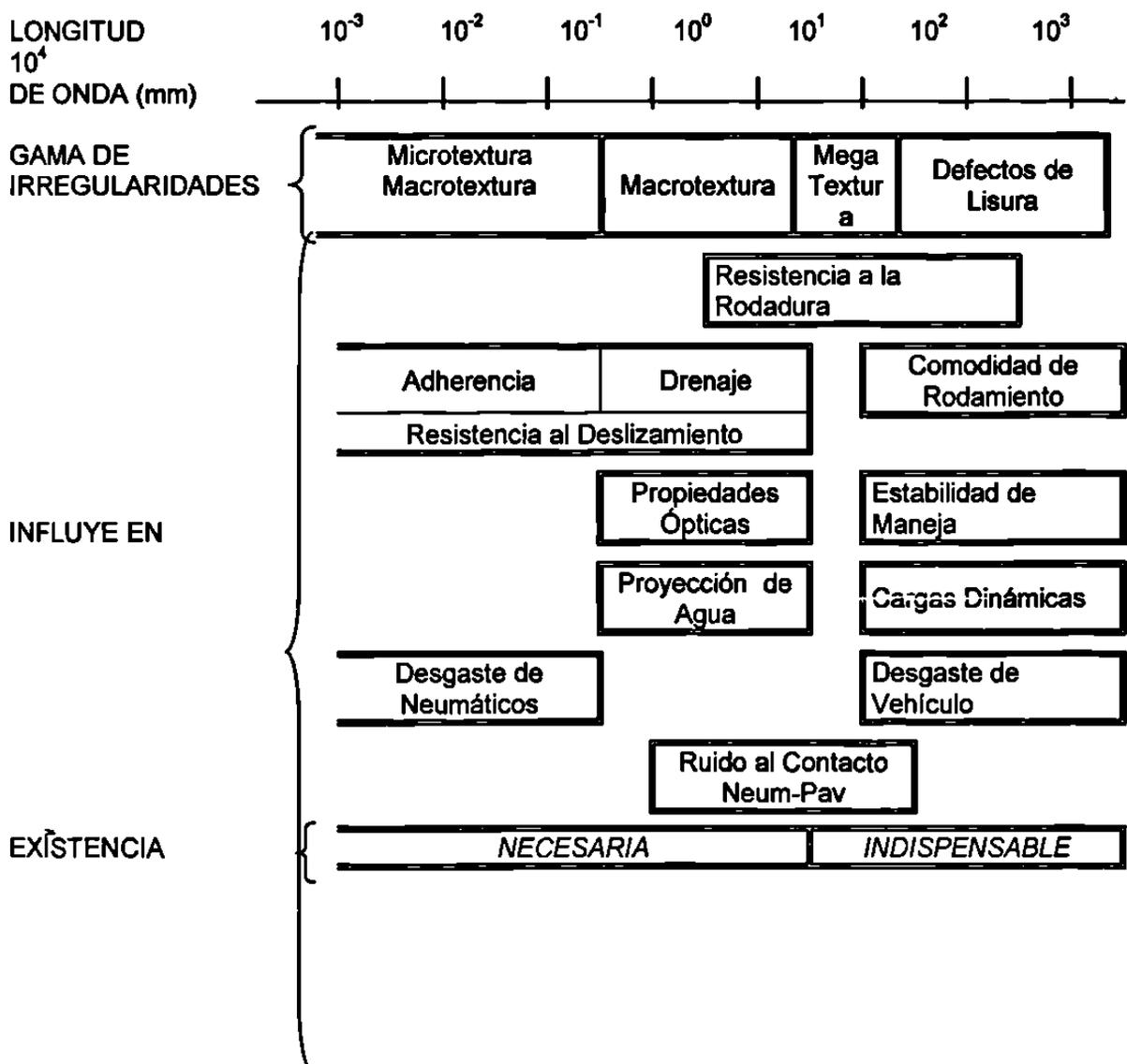


Figura 3. Influencia de la gama de irregularidades superficiales en los fenómenos de interacción entre el vehículo y la carretera (A.I.P.C.R. 1987).

IV.5. 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 períodos 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) (FyR 7).

El estado del neumático influye, de forma significativa, sobre la distancia de frenado del vehículo. Para unas condiciones dadas, un vehículo ligero necesita el doble de distancia de frenado, si circula con neumáticos desgastados, en vez de nuevos, sobre pavimento mojado. Los vehículos pesados requieren mayores distancias para detenerse, que los vehículos ligeros, debido al peso total, la carga del vehículo, los sistemas de frenos, la presión de inflado de los neumáticos, la 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 se deslice, al producirse la pérdida de contacto. El riesgo de la accidentalidad es aún mayor si a las anteriores circunstancias se añaden otros factores negativos, como puede ser el circular con neumáticos desgastados.

IV.6. ÍNDICE DE SERVICIO ACTUAL (ISA).

Para evaluar la calidad de la superficie de las carreteras en México, durante muchos años se utilizó el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of State Highway Officials (AASHO), el cual toma en cuenta un parámetro denominado Present Serviceability Index (PSI), mejor conocido en México como Índice de Servicio Actual (ISA).

El índice o nivel de servicio actual consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino, a la velocidad de operación y lo determina un grupo o panel de evaluadores. Cada evaluador debe calificar el camino de una manera subjetiva, en una escala de 0 a 5, correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie perfecta, respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores.

La tabla 2, muestra la escala del ISA y la calificación correspondiente a la condición del camino.

Este método ayudó a estimar (de una manera subjetiva) las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en el país, con rapidez y sin interrumpir el flujo de los vehículos. Este método tuvo gran difusión, debido

también a que no se contaba con equipos de alto rendimiento para la medición de la rugosidad en la superficie de rodamiento.

Tabla 2. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual (ISA).

<i>ISA</i>	<i>CONDICIÓN DEL CAMINO</i>
4 a 5	Muy Bueno.
3 a 4	Bueno.
2 a 3	Regular.
1 a 2	Malo.
0 a 1	Pésimo.

Dentro del estudio del Banco Mundial para el establecimiento del Índice Internacional de Rugosidad, se realizó la estimación de la evaluación subjetiva con el método AASHTO y el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, y se observó que existen amplias diferencias entre los valores de rugosidad de los grupos de evaluadores de los diferentes países, así como con los resultados de los equipos de medición de rugosidad.

El Banco Mundial recomienda que no se utilice la calificación del panel de evaluadores (ISA) para la obtención o correlación del Índice Internacional de Rugosidad, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es sentido (ISA), el otro es medido (IRI).

IV.7. ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD (IRI).

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos, que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, las que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación

con los equipos de medición de rugosidad en un nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos de tipo respuesta, y que de alguna manera se sustituyera el método de la AASHO, ahora AASHTO, que permite calificar la condición superficial de un camino, sólo en forma subjetiva.

El Índice Internacional de Rugosidad, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial, en 1986 (FyR 6), como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de la rodadura de un camino. El Índice Internacional de Rugosidad tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y está basado en un modelo llamado "Golden Car" descrito en el reporte 228 del NCHRP.

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en mm, m, ó in) de un modelo de vehículo (cuarto de carro), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km, ó mi) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc.

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. El IRI sirve como estándar para calibrar los equipos de medición de la regularidad superficial de una camino.

IV.7.1. Características del modelo.

El modelo de "Cuarto de Carro", utilizado en el algoritmo del IRI, debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la figura 4, e incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del

eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

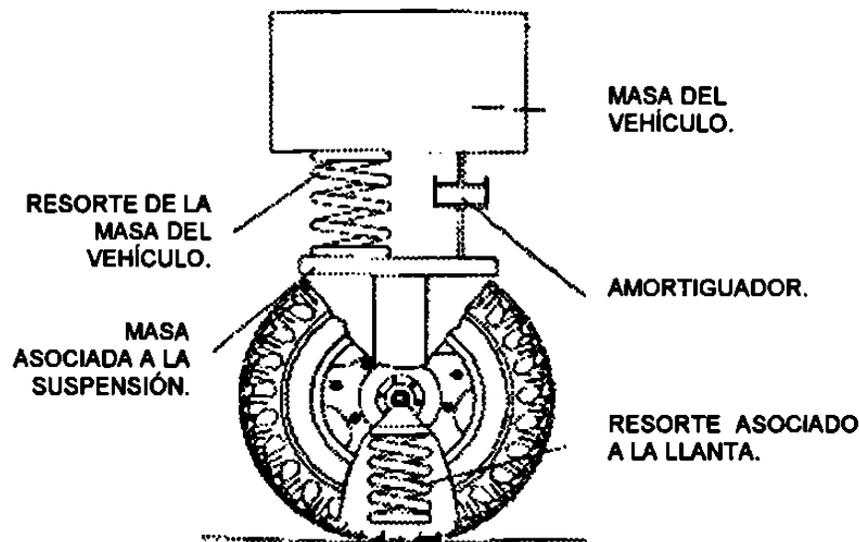


Figura 4. Representación gráfica del modelo "Cuarto de Carro".

El modelo "Cuarto de Carro" fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta. El programa que propone el Banco Mundial para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero, representa la simulación del paso del "Cuarto de Carro" sobre el perfil del camino.

IV.7.2. Escala y características del IRI.

La escala y características involucradas en el IRI son las siguientes:

- Las unidades están en mm/m, m/km, ó in/mi.
- El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km (0 a 760 in/mi) (FyR 6), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. En la figura 5, se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países.

- Para una superficie con pendiente constante, sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente.

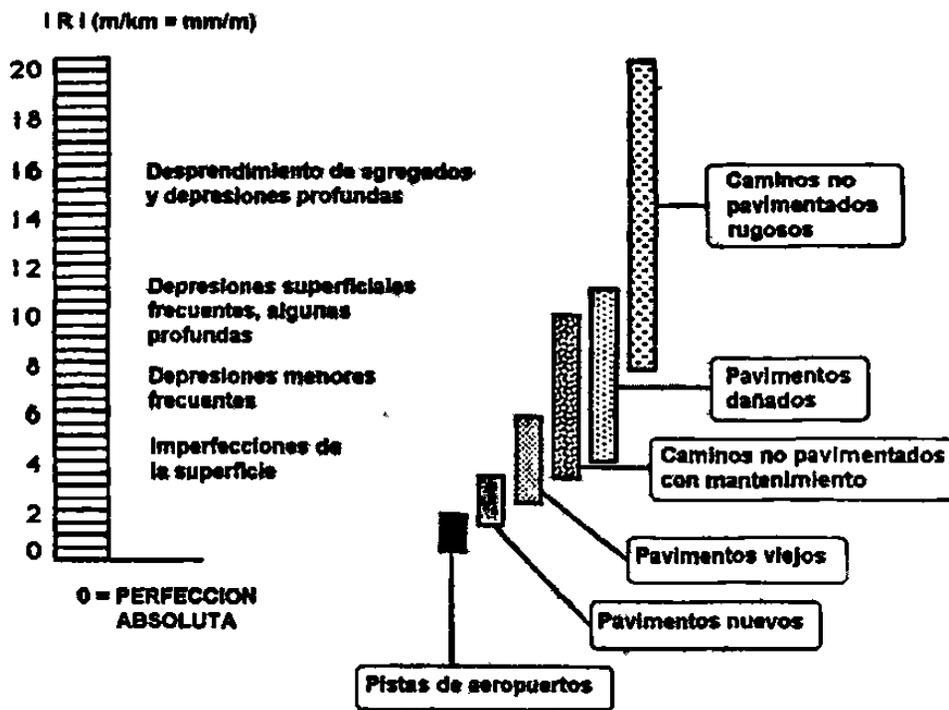


Figura 5. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos.

IV.8. ÍNDICE INTERNACIONAL DE FRICCIÓN (IFI).

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 implantación.

Para estudiar los efectos que los pavimentos provocan en la circulación, es necesario recurrir a intervalos 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, e 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, la estabilidad de manejo, las cargas dinámicas, el desgaste y los 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.

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. 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 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, es necesaria su existencia.

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 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 6, se puede observar la diferencia entre la microtextura y la macrotextura de un pavimento.

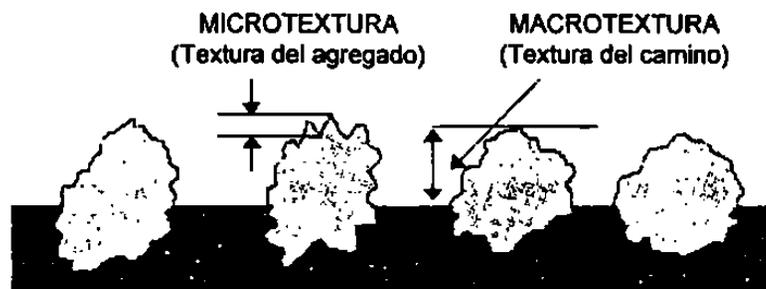
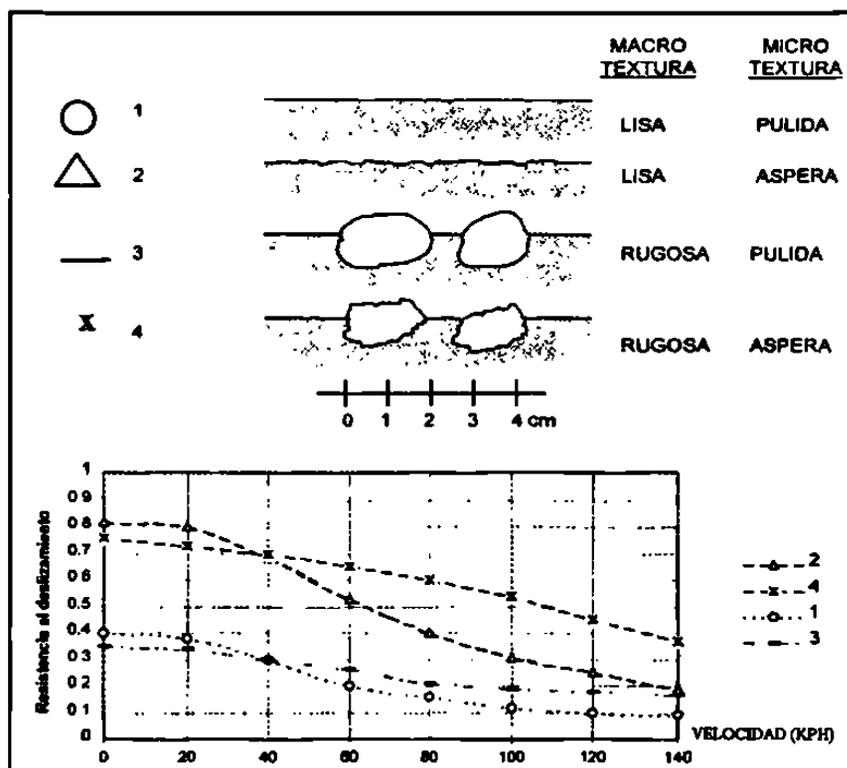


Figura 6. Microtextura y Macrotextura.

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).

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento, a velocidad media y elevada (más de 60 km/hr) (FyR 7) 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 (ver fig. 7).



La macrotextura tiene una pequeña influencia en el consumo de combustibles 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.

Hay macrotexturas de dos tipos: 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 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.

En la figura 8, se esquematiza la condición existente en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento mojado.

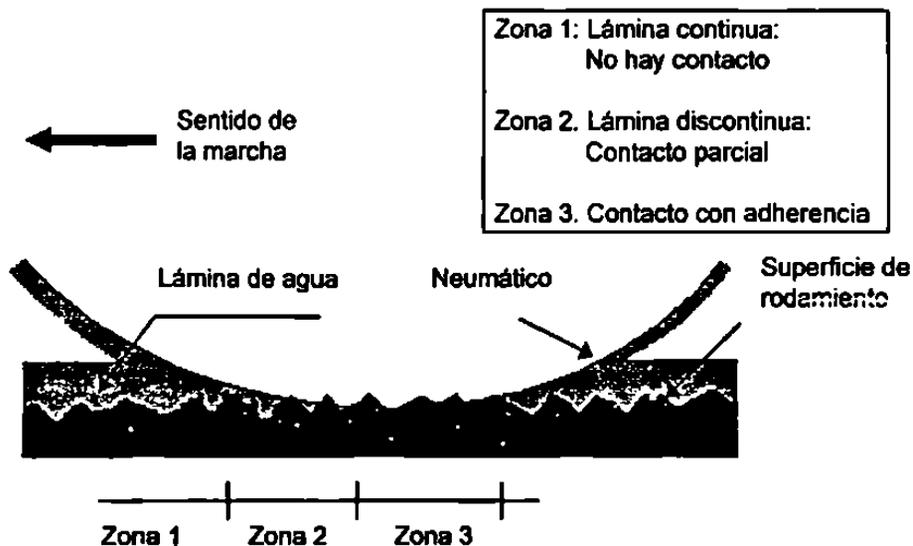


Figura 8. Condición de contacto entre una rueda en movimiento y una superficie mojada.

Ésta se puede dividir en tres zonas:

La zona 1, situada inmediatamente delante del neumático (según el avance), en ella 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 contribuye 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 que la que proporciona el dibujo del neumático. Ésta se obtiene con la macrotextura suficientemente gruesa.

En la zona 3 y, en menor parte en la zona 2, la microtextura logra atravesar la película 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.

El acuaplaneo o hidroplaneo se define como el fenómeno que se produce cuando un neumático que rueda o se 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 del neumático con el pavimento, al incrementarse, en cierto intervalo, la velocidad del 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.

Megatextura. La megatextura corresponde a irregularidades del tipo intermedio, relacionadas con la textura final y también con diversos tipos de fallas, degradaciones o 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, por las vibraciones y las 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.

IV.9. CLASIFICACIÓN DE LAS DEGRADACIONES DEL PAVIMENTO.

IV.9.1. Catálogo de Deterioros.

El catálogo de deterioros en los pavimentos flexibles pretende proporcionar una ayuda práctica para los ingenieros de campo y de proyecto, al describir con detalle los deterioros o fallas más comunes que se presentan en las carreteras de la red nacional mexicana.

Los deterioros enlistados en el catálogo, se subdividen, básicamente, en cuatro apartados; a saber: deformaciones, roturas, desprendimientos, y varios, según el fenómeno preponderante. Se hace notar que las causas mencionadas para

cada deterioro deben complementarse con un examen y análisis de cada problema en particular, para así disponer de un diagnóstico bien fundamentado.

Se considera que el catálogo complementa de una forma práctica, el Módulo de Inventario de Deterioros (INVEDET) del Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos, SIMAP 1ª. Fase: Conservación, desarrollado en el Instituto Mexicano del Transporte.

Por último, se hace notar que el catálogo describe el mayor porcentaje de deterioros en pavimentos mexicanos, habiéndose complementado un pequeño número con información de catálogos similares de otros países.

IV.9.2. Degradaciones de tipo A.

Caracterizan un estado estructural del pavimento, ligado al conjunto de las capas y del suelo o solamente a la capa de superficie. Estas degradaciones tienen por causas una insuficiencia de capacidad de soporte del conjunto de las capas del pavimento, de la subrasante y de las terracerías. Intervienen en la investigación de la solución curativa en conexión con otros criterios, dentro de los cuales se puede citar la deflexión estática (ver tabla 3).

Estas degradaciones son:

- Las deformaciones.**
- Las roderas.**
- La fisuración (de fatiga).**
- La fisuración en mallas.**

IV.9.3. Degradaciones de tipo B.

Estas degradaciones necesitan reparaciones que generalmente no están ligadas a la capacidad de soporte. Sus orígenes son defectos de construcción, defectos de un producto (asfalto, agregado) o condiciones locales particulares que el tránsito puede acentuar (ver tabla 4).

Tabla 3. Nivel de gravedad de las degradaciones de Tipo A.

DEGRADACIÓN	GRAVEDAD		
	1	2	3
Deformaciones Roderas.	Sensibles para el usuario pero poco importantes. $F < 2$ cm	Graves deformaciones, asentamientos localizados o roderas. $2 < f < 4$ cm	Deformaciones muy graves afectando la seguridad o el tiempo de recorrido. $F > 4$ cm
Agrietamiento.	Fisuras finas en las huellas de las llantas o en el eje de la carretera.	Fisuras abiertas y/o ramificadas.	Fisuras muy ramificadas y/o muy abiertas; arrancamientos en los bordes.
Piel de cocodrilo.	Piel de cocodrilo sin movimiento materiales; malla larga (> 50 cm).	Mallas reducidas (> 50 cm), a veces pérdidas de materiales arrancamientos y baches en formación.	Piel de cocodrilo muy abierta, mallas pequeñas (> 20 cm) en forma de adoquín, con pérdida de materiales.
Reparaciones.	Reconstrucción de todo o parte del cuerpo del terraplén.	Intervenciones superficiales para corregir defectos de tipo A.	
	Intervención en la superficie para corregir defectos de tipo B.	Buen comportamiento de la reparación.	Defectos aparentes sobre la reparación misma.

En las degradaciones de tipo B se pueden incluir:

- Las fisuras, (fuera de las fisuras de fatiga) es decir, las fisuras longitudinales de junta, las fisuras transversales de retracción térmica, las fisuras longitudinales o transversales de retracción de las arcillas (dsecación), las fisuras debidas a una inestabilidad del conjunto de la carretera (media luna), etc.

- Los baches.
- Los desprendimientos y, de manera general, todos los defectos de la superficie de tipo exudación, pulimento, descascaramiento, etc.

Tabla 4. Nivel de gravedad de las degradaciones de Tipo B.

DEGRADACIÓN		GRAVEDAD		
		1	2	3
Fisura longitudinal de junta.		Fina y única.	Ancha (1 cm o más) sin desprendimiento o fina y ramificada.	Ancha con desprendimiento de los bordes o ancha y ramificada.
Baches.	Cantidad:	> 5	5 a 10 ; > 5	>10 ; 5 a 10
	Tamaño:	diá. 30 cm máx.	diá. 30 cm; diá. 1.00 m	diá. 30 cm; diá. 1.00 m
		Para 100 m de pavimento.		
Desprendimientos: descascarado, calavereo, pérdida de ligante, pérdida de agregado.		Puntuales sin aparición de la capa de base.	Continuos o puntuales con aparición de la capa de base.	Continuos con aparición de la capa de base.
Movimientos de materiales (por ejemplo, exudación).		Puntual.	Continuos sobre huellas de llantas.	Continuos sobre huellas de llantas y muy marcados.

IV.9.4. Desprendimientos.

Baches. Oquedades de varios tamaños en la capa de rodamiento, por desprendimiento o desintegración inicial. Desprendimiento inicial de los agregados que al paso de los vehículos van formando oquedades. Causas probables:

1. Falta de resistencia de la carpeta.
2. Escasez de contenido de asfalto.
3. Espesor deficiente.

4. Drenaje deficiente.
5. Desintegración localizada por tránsito.
6. Puntos débiles en la superficie.

Identación. Encajamiento de objetos duros en la superficie de rodamiento, produciendo identación o desgaste localizado en la superficie. Causas probables:

1. Huellas de tractores o equipo pesado de construcción.
2. Ponchadura de llantas de vehículos pesados.
3. Accidentes de tránsito.

Levantamiento por congelación. Desplazamiento diferencial hacia arriba que produce desintegración parcial o total de capas del pavimento. Causas probables:

1. Acción de heladas.
2. Ciclos de congelamiento y descongelamiento.
3. Expansión localizada de capas inferiores.
4. Expansión localizada de alguna porción de la sección estructural del pavimento.

Desprendimiento de agregados. Pequeñas depresiones en forma de cráter, por separación de los agregados gruesos de la carpeta asfáltica, dejando huecos en la superficie de rodamiento. Causas probables:

1. Falta de afinidad con el asfalto.
2. Escasez de asfalto.
3. Expansión del agregado grueso.

Erosión avanzada de taludes. Agrietamiento transversal en acotamientos, que con el tiempo y acción del medio ambiente, va formando oquedades o canalizaciones transversales, hasta llegar a la destrucción total de los taludes del cuerpo del terraplén. Causas probables:

1. Acción del viento.
2. Acción de la lluvia.
3. Falta de protección de taludes.
4. Falta de arropamiento en taludes.
5. Mala compactación.
6. Escasez de drenaje superficial.

Erosión total. Destrucción, eliminación o desaparición de una o varias capas subyacentes a la carpeta asfáltica, produciendo falta total de apoyo interior. Causas probables:

1. Falta de drenaje superficial.
2. Falta de subdrenaje.
3. Falta de lavaderos.
4. Acción de crecidas de aguas adyacentes al cuerpo del terraplén.
5. Mala compactación de las capas interiores.
6. Falta de armado o arropo en los taludes de los terraplenes.

Pulido de superficie. Desgaste acelerado en la superficie de la capa de rodamiento, que produce áreas lisas. Causas probables:

1. Tránsito intenso.
2. Agregado grueso de la carpeta con baja resistencia al desgaste.
3. Excesiva compactación.
4. Mezclas demasiado ricas en asfalto.
5. Agregados no apropiados a la intensidad del tránsito.

- 6. Hundimiento de agregado grueso en el cuerpo de la carpeta, o en la base, cuando se trata de tratamientos superficiales.**

Desintegración. Deterioro grave de la carpeta asfáltica, en pequeños fragmentos, con pérdida progresiva de los materiales que la componen. Causas probables:

- 1. Fin de la vida útil de la carpeta asfáltica.**
- 2. Acción de tránsito intenso y pesado.**
- 3. Tendido de la carpeta en climas fríos o húmedos.**
- 4. Agregados contaminados.**
- 5. Contenido pobre de asfalto.**
- 6. Sobrecalentamiento de la mezcla.**
- 7. Compactación insuficiente.**
- 8. Acción de heladas o hielo.**
- 9. Presencia de arcilla en cualquiera de las capas.**
- 10. Separación de agregados y asfalto ligante.**
- 11. Contaminación de solventes.**
- 12. Envejecimiento y fatiga.**
- 13. Desintegración de los agregados.**
- 14. Sección estructural deficiente o escasa.**

Desprendimiento de sello. Desintegración parcial o zonificada de la superficie de rodamiento; cuando ésta se forma por uno o varios sellos, el agregado tiende a desprenderse dejando zonas expuestas, por el arranque de la gravilla o granzón. Causas probables:

- 1. Separación de la película de liga de los áridos, por humedad.**
- 2. Dosificación inadecuada del ligante.**
- 3. Calidad dudosa del material ligante.**
- 4. Mala adherencia en la capa subyacente.**

5. Espesores insuficientes.
6. Ejecución de los trabajos en malas condiciones de clima.

Erosión longitudinal de carpeta. Desintegración parcial de la carpeta asfáltica, principalmente en la frontera de la superficie de rodamiento. La carpeta materialmente se va carcomiendo, reduciendo el ancho efectivo de la carretera.

Causas probables:

1. Labores de conservación inadecuadas.
2. Falta de soporte de la carpeta en los hombros o acotamientos.
3. Erosión natural del agua y el viento.
4. Ciclos de hielo y deshielo.
5. Crecimiento significativo de hierba en los acotamientos.
6. Sobrecargas de pesos en los acotamientos.
7. Mala compactación de las capas.

IV.9.5. Deformaciones.

Burbuja. Ampolla de tamaño variable, localizada en la superficie de rodamiento.

Causas probables:

1. Presiones de vapor o aire en zonas de la capa de rodamiento.
2. Debilidad en el espesor o la consistencia.
3. Liberación de cal en las bases estabilizadas.

Roderas o canalizaciones. Asentamiento o deformación permanente de la carpeta asfáltica en el sentido longitudinal, debajo de las huellas o rodadas de los vehículos. Causas probables:

1. Baja estabilidad de la carpeta.
2. Carpeta mal compactada.

3. Consolidación de una o varias de las capas subyacentes.

Ondulaciones transversales (corrugaciones). Ondulaciones de la carpeta asfáltica, en el sentido perpendicular al eje del camino, que contienen en forma regular crestas y valles alternados, regularmente con separación menor que 60 cm entre ellas. Causas probables:

1. Unión deficiente entre las capas asfálticas y/o la base.
2. Deficiente estabilidad de la mezcla.
3. Intensa acción de tránsito.
4. Bases de mala calidad.
5. Fuerzas tangenciales producto de aceleraciones y frenado de vehículos.
6. Mala calidad de los materiales que conforman la carpeta.
7. Deformaciones diferenciales de los suelos de cimentación, que se reflejan en las capas superiores.

Protuberancias. Desplazamiento de parte del cuerpo de la carpeta asfáltica hacia la superficie, formando un montículo de considerables dimensiones. Causas probables:

1. Acción del tránsito intenso.
2. Estabilidad inadecuada.
3. Liga deficiente entre las capas.
4. Compactación inadecuada.
5. Deformaciones plásticas de los materiales.
6. Acción de heladas.

Asentamiento transversal. Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido transversal al eje del camino. Causas probables:

- 1. Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.**
- 2. Peso propio de la sección del pavimento.**
- 3. Suelos o cimentaciones resilientes.**
- 4. Cargas excesivas o superiores a las de diseño.**
- 5. Cambios volumétricos del cuerpo del terraplén.**
- 6. Compactación inadecuada.**
- 7. Asentamientos diferenciales transversales.**
- 8. Procedimientos de construcción inadecuados.**
- 9. Drenaje o subdrenaje deficiente.**
- 10. Contaminación de capas inferiores.**
- 11. Desplome de cavidades subterráneas.**

Asentamientos longitudinales. Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido longitudinal al eje del camino, en especial en los extremos laterales de la superficie de rodamiento. Causas probables:

- 1. Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.**
- 2. Peso propio de la sección del pavimento.**
- 3. Suelos o cimentaciones resilientes.**
- 4. Cargas excesivas o superiores a las de diseño.**
- 5. Cambios volumétricos del cuerpo del terraplén.**
- 6. Compactación inadecuada.**
- 7. Asentamientos diferenciales longitudinales.**
- 8. Procedimientos de construcción inadecuados.**
- 9. Drenaje o subdrenaje deficiente.**
- 10. Contaminación de capas inferiores.**
- 11. Desplome de cavidades subterráneas.**
- 12. Canalización del tránsito.**

Crestas longitudinales masivas. Montículos o crestas en el sentido paralelo al eje del camino. Suelen presentarse dos y hasta cuatro crestas a todo lo largo de ciertos tramos. Causas probables:

1. Liga inadecuada entre capas asfálticas.
2. Pésima estabilidad de la mezcla asfáltica.
3. Ligante de dudosa calidad.
4. Flujo de la mezcla por acción de derrame de combustible (Diesel).
5. Tránsito intenso muy canalizado.

Desplazamiento transversal de la sección del pavimento. Protuberancias prolongadas de magnitudes considerables en la dirección del tránsito, al borde de la carretera, que causan destrucción total en un corto plazo. Causas probables:

1. Fuertes asentamientos longitudinales.
2. Falta de capacidad estructural del conjunto de las capas del pavimento.
3. Sobrecargas intensas.
4. Nula estabilidad de la carpeta.
5. Nulo soporte lateral o confinamiento.
6. Insuficiente valor relativo de soporte de las cargas.
7. Nula compactación.

IV.9.6. Roturas.

Grietas en el pavimento. Durante los últimos años, han ocurrido avances significativos en el conocimiento de materiales y métodos para el sellado de grietas en los pavimentos de concreto asfáltico. El sellado de las grietas se ha transformado de un proceso de mantenimiento de poco rendimiento, muchas

veces inefectivo, a una técnica de mantenimiento preventivo viable, de costo efectivo, que puede extender la vida útil de los pavimentos.

En forma global, se puede decir que la gran mayoría de los pavimentos son de concreto asfáltico. El intervalo de estas pavimentaciones varía de pavimentaciones secundarias de subdivisiones municipales cubiertas de "seal coats" a pavimentos de gran espesor de concreto asfáltico en carreteras principales. La gran mayoría de los pavimentos de concreto asfáltico, cuando apenas tienen varios años de edad, ya están mostrando grietas de varios tipos.

El sellado de las grietas en los pavimentos de concreto asfáltico es considerado por muchos como una tarea de mantenimiento de baja prioridad, inefectivo, que es hecho sólo después de que se completan otras actividades de mantenimiento de los pavimentos; como recarpeteos, "seal coats" y "fog seals"; y así mismo, sólo si sobra tiempo, recursos y dinero suficiente. Dada esta posición, no se sellan algunas grietas en muchos kilómetros de pavimentaciones, cada año lo cual produce un deterioro acelerado del pavimento, debido a la entrada de humedad y a la oxidación creciente del ligante.

Durante la última década se han dado pasos significativos de mejora en los materiales sellantes y en las técnicas para el sellado de grietas. El sellado de grietas no es más una tarea inefectiva que demora mucho. Con los materiales y equipos existentes hoy en día, el sellado de grietas tiene un avance de baja prioridad en la tarea de mantenimiento, frente a una técnica de mantenimiento preventivo viable y efectivo que puede aumentar significativamente la vida útil de pavimentos de concreto asfáltico.

IV.9.6.1. Agrietamiento en los pavimentos de concreto asfáltico.

IV.9.6.1. Agrietamiento en los pavimentos de concreto asfáltico.

Los sistemas de pavimentos de concreto asfáltico son típicamente compuestos de un subgrado compactado, una base granular y una capa de concreto asfáltico superficial. En contraste con los pavimentos rígidos de concreto hidráulico, los pavimentos asfálticos son diseñados para formar sistemas flexibles que pueden formarse sin rajarse o agrietarse cuando son sujetos a pesos vehiculares y a contracciones y expansiones debidos a los efectos térmicos o movimientos del subgrado y cambios de volumen.

Varios factores pueden influenciar el grado de flexibilidad de los pavimentos asfálticos, incluyendo las temperaturas ambientales, las características del agregado, la rigidez del cemento asfáltico, la susceptibilidad a temperaturas del cemento asfáltico, el contenido del asfalto en la mezcla y el grado de compactación. Cada uno de estos factores pueden tener un efecto significativo en la rigidez y la flexibilidad del pavimento. Es de interés especial conocer las características de rigidez y susceptibilidad a los cambios de temperaturas de los cementos asfálticos, con respecto al agrietamiento de pavimentos.

Estudios realizados por el IMT y la SCT, principalmente, han demostrado que la viscosidad de los cementos asfálticos en servicio puede aumentar de 10 a 50 veces en cuatro años, dados los efectos de envejecimiento, por razón de oxidación. La aceleración y magnitud del envejecimiento está relacionado a muchos factores, incluyendo el grado de la compactación de la mezcla, el contenido del cemento asfáltico, las características de la absorción del agregado y el clima.

En pavimentos muy viejos, son comunes viscosidades de cemento asfáltico recobrados a 60°C de 500000 poises y mayores lo cual indica que la viscosidad puede aumentar, dado el envejecimiento en servicio, al largo plazo, hasta 125 veces (asumiendo una viscosidad inicial a 60°C de 4000 poises) (FyR 5).

Los pavimentos de concreto asfáltico que contienen cementos asfálticos que han envejecido significativamente no son flexibles, como cuando fueron construidos, debido al aumento de la rigidez del cemento asfáltico. El aumento de la rigidez del pavimento resulta en un pavimento que tiene la habilidad reducida de redistribuir las tensiones causadas por deformaciones térmicas o por efectos de cargas. Estas grietas ocurren cuando el pavimento está sujeto a cargas de tráfico pesado, temperaturas frías, bajas bruscas de temperatura o movimientos del subgrado.

Se han hecho estudios considerables sobre las influencias de la mezcla del concreto asfáltico y las propiedades de los componentes en la formación de grietas. La mayoría de estos estudios han determinado que varias propiedades de las mezclas pueden influenciar la formación de grietas, pero se ha descubierto que las propiedades del cemento asfáltico tienen que tener efectos más significantes. En general, los cementos asfálticos de grados más rígidos resultan en un aumento de grietas debido a las bajas temperaturas.

Adicionalmente, los cementos asfálticos con un alto grado de susceptibilidad a las temperaturas, como los indicados por el Índice de Penetración (PI) o Número de Pen-Vis (PVN), tienen un potencial de agrietamiento mayor, que los asfaltos con susceptibilidad a temperaturas bajas.

IV.9.6.2. Tipos de grietas.

Varios tipos de grietas pueden ocurrir en los pavimentos de concreto asfáltico durante, el envejecimiento del mismo. La mayoría de las grietas pueden ser clasificadas como: relacionadas con las temperaturas, o relacionadas con la fatiga. Las grietas reflexivas, en un recarpeteo nuevo de concreto asfáltico, constituyen otro tipo de grieta muy común.

Grietas de reflexión. Grietas longitudinales y transversales que reflejan exactamente el patrón de agrietamiento o de juntas de un pavimento existente, cuando es reencarpetado con concreto asfáltico. Causas probables:

1. Movimiento del pavimento subyacente.
2. Liga inadecuada entre las capas.
3. Posibles contracciones de la capa subyacente.

Grietas de reflexión tipo 2. Agrietamiento de la carpeta asfáltica, siguiendo o no un patrón determinado. Causas probables:

1. Falta de unión en las grietas de capas inferiores.
2. Agrietamiento de capas inferiores.
3. Movimiento de capas subyacentes.
4. Contracción o dilatación de las bases estabilizadas con cemento.

Agrietamiento parabólico. Grietas en forma de parábola o de media luna, que se forman en la carpeta asfáltica, en la dirección del tránsito. Causas probables:

1. Débil carpeta de rodamiento.
2. Zonas de frenaje de las ruedas.
3. Mezcla inestable.
4. Efecto en el arranque de las ruedas.

Grieta errática o en zig-zag. Agrietamiento en desorden de la carpeta asfáltica, siguiendo patrones longitudinales en forma errática o de zig-zag. Causas probables:

1. Acción del hielo.
2. Cambios extremos de temperatura.
3. Base defectuosa.

4. Terraplenes con taludes inestables.

Grietas finas. Pequeñas fisuras superficiales muy próximas la una con la otra, ya que no conforman un patrón regular y que se extienden a cierta profundidad, pero no al espesor total de la carpeta. Causas probables:

1. Envejecimiento de la carpeta asfáltica.
2. Oxidación del asfalto.
3. Mala dosificación del asfalto.
4. Exceso de finos en la carpeta asfáltica.
5. Compactación efectuada con mezclas muy calientes.

Agrietamiento "piel de cocodrilo". Fisuras en la superficie de la carpeta asfáltica, que forman un patrón regular, con polígonos hasta de 20 cm. Grietas interconectadas formando pequeños polígonos que asemejan la piel de un cocodrilo. Causas probables:

1. Soporte inadecuado de la base.
2. Debilidad de la estructura del pavimento.
3. Carpetas rígidas sobre suelos resilientes de cimentación.
4. Fuertes sollicitaciones del tránsito.
5. Fatiga.
6. Envejecimiento.
7. Escasez de espesor de la carpeta.
8. Evolución progresiva de agrietamiento, tipo mapa.

Agrietamiento tipo mapa. Forma de desintegración de la superficie de rodamiento, en la cual el agrietamiento se desarrolla en un patrón semejante a las subdivisiones políticas de un mapa, con polígonos mayores que los 20 cm. Causas probables:

1. Calidad deficiente de alguna de las capas de la sección estructural.
2. Debilidad de la estructura del pavimento.
3. Carpetas rígidas sobre suelos resilientes de cimentación.
4. Fuertes solicitaciones del tránsito.
5. Fatiga.
6. Envejecimiento.
7. Espesor escaso de la carpeta.

Grieta transversal. Agrietamiento de la carpeta que sigue un patrón transversal o perpendicular al eje del camino. Causas probables:

1. Acción del tránsito.
2. Reflejamiento de grietas en capas subyacentes.
3. Espesor insuficiente de la carpeta.
4. Contracción térmica de la superficie de rodamiento.
5. Deficiencia de juntas transversales de construcción.

Agrietamiento longitudinal. Fisura o grieta paralela al eje del camino o en muchos casos sobre el eje del camino. Causas probables:

1. Deficiencias en la junta de construcción longitudinal.
2. Reflejo de grietas en la capa de base.
3. Asentamiento de las capas por el tránsito.
4. Espesor insuficiente.
5. Contracción de los materiales de la capa de rodamiento.
6. Asentamientos aislados de las capas interiores.
7. Drenaje insuficiente.

Agrietamiento longitudinal en el hombro del terraplén. Líneas de rotura producidos en los bordes de la carretera, paralelas al eje de la misma. Causas probables:

1. **Movimiento diferencial en ampliaciones de corona.**
2. **Cambios volumétricos diferenciales entre el hombro del terraplén y la parte central del mismo.**
3. **Rotura del equilibrio hidráulico.**
4. **Degeneración por fallas de talud.**
5. **Empuje hidrostático de agua almacenada.**
6. **Influencia de la compactación (nula / poca / excesiva).**
7. **Susceptibilidad de los suelos finos al agrietamiento.**
8. **Uso de materiales finos muy plásticos.**
9. **Acción capilar intensa.**
10. **Fuerte acción solar.**
11. **Alteración del período seco-lluvia.**

En resumen, podemos definir lo siguiente:

Grietas térmicas. Son grietas térmicamente relacionadas, que aparecen como grietas transversales y longitudinales y resultan de la inhabilidad del concreto asfáltico para redistribuir las tensiones horizontales que acontecen sobre la anchura y longitud del pavimento, cuando las temperaturas bajan. En pavimentos diseñados y construidos propiamente, las grietas transversales extienden la anchura completa del pavimento y ocurren en extensiones largas (mayores de 30 m), normalmente los primeros.

En cuanto la pavimentación envejece y el cemento asfáltico se torna rígido, las grietas transversales aparecen en extensiones menores y pueden estar presentes en pavimentos viejos a distancias menores que 3 m. Las grietas longitudinales térmicamente relacionadas ocurren cuando la rigidez del pavimento es tal, que las tensiones producidas térmicamente en las direcciones transversales no pueden ser distribuidas adecuadamente por el pavimento. Estas grietas normalmente aparecen como una única grieta, cerca del centro de

la anchura del pavimento, en pavimentos de dos fajas, o a distancias de 3 a 4.5 m para pavimentos más largos. Las grietas transversales térmicamente relacionadas tienden a aparecer en los pavimentos, en 1 a 3 años, mientras que grietas longitudinales empiezan poco después.

Grietas de fatiga. Grietas de fatiga o de “piel de cocodrilo” son generalmente causadas por la inhabilidad del pavimento para redistribuir las tensiones resultado de deformaciones verticales causadas por los pesos del tráfico o fallas de la base o subbase. Las grietas de fatiga generalmente aparecen en forma de bloques, en extensiones de 10 a 30 cm. El agrietamiento muchas veces es localizado y se presenta donde existe más humedad, espesor inadecuado de la base, o mala compactación de la base o subgrado; los agrietamientos de fatiga suelen prevalecer en las huellas de los neumáticos, en la pavimentación de alto volumen.

En pavimentos diseñados y construidos apropiadamente, las grietas de fatiga aparecen en las huellas de los neumáticos; ésto ocurre cuando el pavimento llega cerca del final de su vida útil. Estas grietas de fatiga pueden ocurrir dentro de un corto plazo de la construcción del pavimento en áreas en que ocurren las deficiencias de la construcción o sobre la carga. Siguiendo períodos de clima húmedo, las grietas de fatiga pueden ocurrir al lado de grietas térmicas abiertas, provocando el efecto de fractura, por la entrada del agua superficial en las capas de las bases y subgrado de las grietas abiertas.

Grietas reflexivas. Las grietas reflexivas en el recarpeteo del concreto asfáltico son causadas por las transferencias de discontinuidad de los movimientos horizontales o verticales de los materiales de pavimentación de abajo, a un área localizada del recarpeteo. Estas grietas resultan de acuerdo con la capacidad del recarpeteo de concreto asfáltico, para ajustarse a estos movimientos. Las causas típicas de grietas reflexivas en recarpeteo incluyen:

1. Agrietamiento arriba de las juntas de expansión y contracción, en el concreto hidráulico dado el movimiento horizontal localizado o inducido por la expansión y contracción térmica del concreto en la junta. También pueden resultar grietas reflexivas de los movimientos verticales de las fallas en las juntas.
2. Agrietamiento arriba de las grietas, en pavimento de concreto hidráulico, dado el movimiento horizontal o vertical diferencial de las secciones de la losa.
3. Agrietamiento arriba de las grietas térmicas transversales y longitudinales, en pavimentos de concreto asfáltico, dado el movimiento horizontal localizado, resultado de efectos térmicos o movimientos localizados de fallas verticales diferentes, resultado de pesos vehiculares.
4. Agrietamiento arriba de las áreas fatigadas, en el pavimento de concreto asfáltico, dados los movimientos localizados verticales diferenciales, en las áreas fatigadas.

Los agrietamientos reflexivos de las capas de concreto asfáltico y su prevención son una precaución principal, cuando se están recarpeteando pavimentos antiguos; pues grietas reflexivas pueden reducir grandemente la vida útil de las capas.

IV.9.7. Varios.

Llorado de asfalto. Flujo de liberación del asfalto hacia la superficie de una carpeta asfáltica, formando una película o capa peligrosa y/o ascenso del asfalto a través de grietas. Causas probables:

1. Exceso de asfalto.
2. Excesiva compactación de mezclas ricas.
3. Muy elevada temperatura de compactación.

4. Sobredosificación de riego de liga.

Afloramiento de humedad. Aparición de zonas húmedas en la superficie, con o sin encharcamiento. Causas probables:

1. Deficiencia de drenaje superficial.
2. Deficiencia o escasez de subdrenaje.
3. Flujo ascendente de agua a través de grietas.
4. Zonas mal compactadas.
5. Capas porosas o de textura abierta.
6. Bases saturadas.
7. Flujo capilar de agua.
8. Presiones hidrostáticas por el efecto del tránsito.

Marcado de huella. Impresión en relieve, localizada en la superficie de rodamiento. Causas probables:

1. Superficies de rodamiento débiles o suaves.
2. Exceso en el contenido de asfalto.
3. Altas temperaturas ambientales.
4. Estacionamiento prolongado de vehículos pesados.
5. Mezclas con estabilidad deficiente.
6. Exceso de riegos de liga.
7. Huellas de neumáticos por tránsito compactador.

Contaminación de agregados. Inclusión de materiales diferentes o ajenos a los agregados especificados, tales como la piedra pómez, de diferentes características y propiedades mecánicas. Causas probables:

1. Dosificación inapropiada.
2. Pobre control de calidad.

3. Contaminación de bancos de agregados.

Expulsión de finos. Material fino sobre la superficie de rodamiento, acumulado en zonas adyacentes a las grietas. Causas probables:

1. Acumulación de agua libre en las capas subyacentes.
2. Exceso de finos en las capas de la sección del pavimento.
3. Expulsión de cemento a través de grietas, en bases estabilizadas.
4. Acción del tránsito intenso.

Crecimiento de hierba a través de la carpeta. Producto de agrietamiento en acotamientos y en los hombros de la carretera; la hierba silvestre crece, aflorando por las grietas y avanzando con la humedad, hasta prácticamente erosionar o destruir parte de la carpeta. Causas probables:

1. Deficiente drenaje superficial.
2. Inadecuadas labores de conservación.
3. Falta de sellado de las grietas cuando aparecen.

Crecimiento de hierba entre carpeta y cuneta para drenaje superficial. Jardín silvestre que aflora o crece longitudinalmente, entre la carpeta asfáltica y las cunetas de concreto hidráulico para drenaje superficial. Causas probables:

1. Drenaje superficial deficiente.
2. Labores de conservación inadecuadas.
3. Falta de sellado longitudinal.

Obstrucciones de alcantarillas. La hierba silvestre invade y crece en las alcantarillas para el drenaje, obstruyendo parcial o totalmente el flujo del agua, además de obstruir el señalamiento geométrico. Causas probables:

1. Conservación inadecuada.

Azolve en el drenaje superficial. Arrastre de material suelto que, por falta de conservación periódica, tapa o azolva el drenaje superficial; repercute en un mal comportamiento de la sección del pavimento. Causas probables:

1. Descuido y falta de oportunidad en el mantenimiento preventivo de un camino.

Obstrucción del drenaje por desprendimiento de rocas. En taludes muy verticales, es frecuente el desprendimiento de rocas sobre la carretera y, en especial, en los acotamientos para el drenaje superficial. Lo anterior obstruye parcial o totalmente el flujo adecuado del agua por su drenaje, repercutiendo en el comportamiento de la sección del pavimento. Causas probables:

1. Falta de mantenimiento preventivo oportuno.

Borde longitudinal o elevación diferencial de la carpeta entre carriles. Cambio brusco del perfil transversal de la superficie de rodamiento, entre el tendido de capas. Causas probables:

1. Deficiencia en los procedimientos constructivos.
2. Deficiencia en el control de calidad.
3. Asentamientos longitudinales.
4. Discontinuidad en el bombeo.

**Capítulo V: MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN Y EL
DIAGNÓSTICO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EN LAS
CARRETERAS.**

V.1. ESTUDIOS PRELIMINARES.

Los estudios preliminares constituyen una tarea clave del estudio del presupuesto. Es la fase de concepción de las obras de mantenimiento vial, y en particular, de los trabajos de reconstrucción, para los cuales se necesita un diseño detallado completo de la sección de carretera a reconstruir. Estos estudios no deben contemplar solamente el pavimento, sino también, y en primer lugar, las partes de la carretera que contribuyen a la estabilidad de la estructura: entorno geográfico (geología, hidrogeología, tectónica, hidrología, vegetación, ecología, etc.), estabilidad del volumen, drenaje de las aguas superficiales y subterráneas, terracerías, etc. Será también necesario emprender un inventario exhaustivo de las fuentes de materiales de construcción existentes en la región y, por fin, estudiar diferentes soluciones para diseñar el pavimento.

Durante estos estudios preliminares se efectúan los estudios económicos que contemplan las diferentes soluciones técnicas para las obras de mantenimiento y los diferentes factores económicos (tránsito generado, tránsito derivado y otros).

Para clasificar con mayor precisión ($\pm 20\%$), los resultados de los cálculos de Planeación Nacional, es necesaria esta fase preliminar, que corresponde a un estudio de factibilidad.

Estos estudios se contratan, en su mayoría, con una consultoría privada, ya que la Secretaría no cuenta con la capacidad, en equipo y en personal, para realizar estos estudios.

El Banco Mundial redactó y aprobó términos de referencia muy detallados, que luego comentó a los consultores; pero parece que en el campo no son aplicables estas prescripciones, por falta de supervisión.

V.1.1. Estudios técnicos.

Es sorprendente constatar que en México se utilizan métodos de estudio obsoletos, que no corresponden a la magnitud de la red y a los problemas específicos de este país.

Es el único gran país de América Latina que no tiene instrumentos de medida de deflexiones con gran rendimiento. Se continúa utilizando la tradicional Viga Benkelman y algunos instrumentos modernos que dan excelentes resultados pero con un rendimiento muy bajo.

Se considera en México la deflexión como una medida que permite un diseño del pavimento. Esta es una noción ahora obsoleta. La deflexión tiene solamente un papel de indicador.

Una temperatura corporal elevada indica un estado enfermizo, no la naturaleza de la enfermedad. Un valor importante de la deflexión indica un defecto, pero no puede precisar su origen ni tampoco su naturaleza.

Un valor de la deflexión importante; 2 mm por ejemplo, indica un problema que puede venir del pavimento, de las terracerías, de una antigua alcantarilla metálica, olvidada en un terraplén, etc.

Durante estos estudios técnicos preliminares, el ingeniero debe utilizar al máximo los resultados de los inventarios "a pie" y limitar las investigaciones "in situ". Su trabajo es más un trabajo de reflexión que de aplicación de reglas precisas o de fórmulas.

Debe dedicarse, sobre todo, al estudio de las causas de los daños y contemplar todas las soluciones posibles para la reconstrucción de la carretera, teniendo en cuenta las obras de drenaje, el mejoramiento de la estabilidad de las plataformas y el mejoramiento de las terracerías, para aumentar la capacidad de soporte de la subrasante. Esto significa que debe estar en el campo durante un período bastante largo y no confiar las operaciones y los estudios importantes a técnicos o topógrafos.

Él mismo debe estudiar en forma preliminar todas las soluciones posibles para la construcción de los pavimentos, teniendo en cuenta los costos de construcción y el mantenimiento durante un período determinado y considerar la construcción de la capa de rodamiento por etapas sucesivas. Para realizar estos estudios se puede apoyar en catálogos de pavimentos existentes.

Especialmente evitará utilizar estos métodos de construcción tradicionales, todavía utilizados en México y que conducen a resultados discutibles:

- Renivelaciones, carpetas y riegos de sello posteriores; que corrigen los efectos de los daños, pero no las causas. Estos efectos se pueden repetir a veces 3 meses después de las obras.

- **Concretos asfálticos con materiales de granulometría abierta, que necesitan un porcentaje de asfalto muy elevado (más de 14%) y que deben ser recubiertos un año después de su construcción, por un riego de sello. Este riego de sello sirve para cerrar las numerosas fisuras que se producen por razón de exceso de asfalto y, para asegurar una cierta rugosidad para la seguridad del usuario. El costo de este proceso supera en 20% el precio de un concreto asfáltico construido en una sola vez, con métodos adecuados (FyR 3).**
- **Se puede constatar que la utilización de las escorias volcánicas (tezontles) para capa de base, concretos asfálticos y riegos de sello conduce a períodos de vida muy cortos. Esta escoria tiene un coeficiente de desgaste demasiado alto para ser utilizado en las carreteras de tránsito pesado o de tránsito mediano. Se podrían estudiar procedimientos de utilización de estos materiales para base con el uso de estabilizantes, empleando métodos de ensayo específicos.**

Para comparar las diferentes soluciones técnicas estudiadas, no se necesitará el uso de programas sofisticados. Para estudiar soluciones en tramos relativamente cortos (20 a 50 km), es suficiente utilizar los paquetes informáticos existentes para calcular los indicadores económicos clásicos y efectuar los cálculos de sensibilidad. Lo más importante es la utilización de parámetros "mexicanos" y no el uso de coeficientes y parámetros procedentes de métodos y países extranjeros.

En este nivel técnico, las analogías se efectúan comparando las reducciones en los costos de operación de los vehículos, estudiados localmente y no utilizando las ventajas debidas a otros factores económicos. Para efectuar los cálculos económicos de comparación necesarios, es suficiente utilizar los paquetes informáticos existentes (Lotus 123 V3.1, Quattro Pro 5, etc.).

V.1.2. Estudios económicos.

Las tareas a ejecutar durante la fase económica corresponden a un diagrama de flujo clásico, de un estudio de factibilidad. Sin hacer una lista exhaustiva de las tareas a ejecutar, se pueden citar las siguientes actividades.

- Estudios de tránsito (composición, volumen por tipo de vehículo, etc.).
- Estudio de las cargas por eje.
- Estudios de los tránsitos, derivados y generados.
- Estudios del costo de operación de vehículos, con y sin proyecto, utilizando realmente parámetros y factores locales.
- Estudios de los beneficios relativos al valor del tiempo; se deberán efectuar medidas reales de velocidad en secciones típicas y no en análisis teóricos usando manuales extranjeros o normas geométricas que no corresponden a la realidad (problemas de los topes, en particular).

El cálculo económico se efectúa comparando:

- La lista de las inversiones, incluyendo eventualmente los gastos necesarios para la solución de referencia.
- El flujo anual de las ventajas económicas, que incluye las economías sobre el costo de operación de los vehículos, ligadas al tránsito normal o derivado; las ventajas ligadas al tránsito generado o las ventajas a los productores, y las economías en mantenimiento vial (positiva o negativa).
- El valor residual de la carretera, al fin de su vida útil.

Los cálculos económicos se acompañan con un análisis de sensibilidad.

No es obligatorio ni necesario utilizar sistemas informáticos complicados, para estos estudios económicos. Los paquetes comerciales son suficientes para efectuar los cálculos de los indicadores.

V.1.3. Primer análisis integral.

Estos estudios preliminares concluyen en un examen de los resultados de parte de un grupo de análisis. Es posible que durante esta primera síntesis, las acciones previstas en algunos tramos sean rectificadas y se puede decidir, por ejemplo, posponer una obra de reconstrucción y proponer un mantenimiento de espera.

V.1.4. Afinación de los estudios técnicos y económicos.

En la fase anterior, se determinan los tramos que se van a estudiar y las soluciones que se van a emplear para la realización de las obras. El objetivo de esta afinación es la elaboración de los planos de construcción que se van a utilizar para la licitación y para la realización de las obras.

Los términos de referencia para estos tipos de diseño fueron ya redactados para los estudios de los tramos del programa.

Es útil recordar el alcance de las tareas y la lista de los documentos a someter a la Dirección Técnica:

- El levantamiento detallado de las obras existentes, incluyendo la superficie del pavimento.
- El estudio detallado de la red de drenaje.
- El estudio de la lucha contra la erosión.
- El estudio de la estabilidad de los taludes y terracerías.
- La determinación de las zonas homogéneas.
- El estudio de las causas de las degradaciones.
- El estudio de los pavimentos.

- **El diseño geométrico de la superficie del pavimento, incluyendo la optimización de las cantidades de obras.**
- **El estudio de los dispositivos de seguridad vial.**
- **Las especificaciones técnicas particulares de construcción.**
- **El cálculo de las cantidades y estimaciones de los costos.**
- **Los estudios económicos detallados.**

Los estudios económicos, en esta etapa, son solamente una actualización de los estudios preliminares anteriores, y se integran de conformidad con los acuerdos establecidos con el Banco Mundial.

V.2. CONSIDERACIONES BÁSICAS.

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 para 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 del 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, de los materiales utilizados, y del desgaste producido por los vehículos, así como del deterioro producido por los factores climáticos, entre otros.

Hay varias razones para evaluar la capacidad de los pavimentos y muchas maneras de hacerlo. En cada caso, sin embargo, el primer paso consiste en supervisar o medir algunas características del pavimento. Así, la evaluación involucra el análisis de los datos obtenidos, a través de algún proceso teórico o empírico, para estimar con un razonable grado de precisión la capacidad de carga y la vida de servicio del pavimento según las condiciones esperadas del tránsito.

En relación con el tema de la evaluación, es importante tomar en cuenta las necesidades de la red total de carreteras de la unidad administrativa considerada (en este caso el país) y las necesidades de un proyecto en particular, dentro de la red. Por ejemplo; el comportamiento de los tramos de la red, en diferentes acciones o la asignación de recursos se determinará a partir del análisis, en el nivel de red y estos criterios de decisión eventualmente influirán en la disponibilidad de fondos para la rehabilitación de algún proyecto en particular. Los sistemas de administración o gestión de pavimentos (SGP) deben incluir procedimientos para analizar la red en su conjunto, por lo menos en un suficiente nivel de detalle, para establecer una imagen inicial que permita definir proyectos candidatos. Asimismo, las decisiones sobre las acciones específicas de mantenimiento a realizar en cada proyecto deberán tomarse con base en la información más detallada. Por lo tanto, los SGP deben tomar en

cuenta los requerimientos de información tanto del nivel de red como del nivel de proyecto.

El primer paso en cualquier evaluación es encontrar un indicador con el cual trabajar. Sus valores específicos, para los diferentes segmentos de la red bajo estudio, pueden obtenerse a partir del plan general de supervisión de la red, aplicable a todos los tipos de datos de evaluación. La supervisión casi siempre se realiza a través de la medición de deflexiones o curvaturas de la superficie del pavimento, sujeta a cargas estáticas o repetidas (dinámicas).

La necesidad de realizar una evaluación puede ser señalada por otros tipos de evaluación, tales como la revisión de la calidad de servicio de la superficie o la supervisión de los daños sobre la misma.

En el programa de evaluación preliminar o de nivel de red se requieren algunos valores límite o criterios que ayuden a determinar el momento en que deba realizarse una evaluación más detallada. Estos pueden ser indicadores de otros tipos de evaluación, pero para supervisión comúnmente se utilizan niveles límite de deflexión, para una prueba de carga específica. Con este fin, puede también emplearse la información proveniente de otros tipos de evaluación periódica, como la de resistencia al derrapamiento, la calidad de servicio de la superficie y el registro de daños sobre la misma. Estos elementos deben ser complementados con la continua observación del ingeniero de mantenimiento vial, una persona muy importante del equipo de administración de pavimentos, quien debe reportar cualquier cambio rápido o inusual en el comportamiento o condición de los pavimentos.

V.3. EVALUACIÓN NO-DESTRUCTIVA.

La diferencia entre evaluación destructiva y no destructiva depende normalmente de la alteración física de los materiales, ya que la primera significa la destrucción del pavimento mediante la excavación de un pozo para muestreo, en cambio la evaluación no destructiva se refiere a las mediciones de la respuesta de un pavimento a una fuerza externa o transmisión de energía, donde el pavimento no es alterado por las mediciones y tales mediciones pueden ser repetidas tantas veces como sea necesario.

Muchas técnicas efectivas de evaluación involucran la medición de deflexiones o curvaturas de la superficie de rodamiento, expuestas a cargas estáticas o dinámicas, combinándolas con pequeños corazones o testigos para obtener los espesores y muestras de los materiales subyacentes para probarlos posteriormente en el laboratorio. Estos métodos serán considerados como no destructivos en discusiones subsiguientes, ya que no involucran alteraciones graves del pavimento.

En principio, es importante reconocer que existen muchos métodos analíticos para la evaluación de los pavimentos. Las cuatro clases más importantes de ellos son:

- La comparación empírica del comportamiento medido, usualmente deflexiones, con deflexiones permisibles estimadas a partir del comportamiento pasado, observado de pavimentos.**
- La comparación del comportamiento medido (generalmente deflexiones) contra criterios permisibles calculados a partir de modelos de sistemas multicapa, usualmente en términos de deflexiones.**
- El uso de un método de diseño existente para estimar la vida remanente de un pavimento o su capacidad para soportar cargas de tránsito, a partir del comportamiento observado (generalmente deflexiones).**

- **Métodos combinados que utilizan pruebas de materiales para generar datos de entrada a análisis teóricos de fatiga y mediciones de comportamiento (generalmente deflexiones) para proporcionar criterios límite.**

Los tres primeros enfoques han sido usados exitosamente, en condiciones limitadas. Estos son difíciles de adaptar a cambios en los materiales, los ambientes o los límites de carga. El cuarto método ofrece la solución más general al problema de la evaluación.

Los métodos de prueba no destructivos se clasifican generalmente en cuatro categorías generales:

- *Medición de la respuesta a una carga estática o a la aplicación simple de una carga con movimiento lento.* Se obtiene midiendo la deflexión de la superficie del pavimento bajo la carga. Los instrumentos más comunes que se emplean para hacer estas mediciones son: la Viga Benkelman, el Deflectómetro viajero, y el Deflectómetro de Lacroix. Este método no representa adecuadamente los efectos de las cargas circulantes del tránsito y no permite fácilmente determinar el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas de pavimentos rígidos.
- *Medición de la respuesta a una carga compuesta por una parte estática y otra repetida o dinámica de tipo senoidal.* Las deflexiones se miden a través de sensores inerciales de velocidad (geófonos), los equipos de este tipo más comúnmente usados son: el Dynaflect, y el Calificador de Caminos (Road Rater). Una desventaja es que dan lugar a deflexiones bajas no representativas y, adicionalmente, la frecuencia de la carga dinámica afecta la deflexión resultante, siendo generalmente difícil

establecer una frecuencia de carga que sea representativa del paso de los vehículos.

- *Medición de la respuesta a una carga dinámica de impacto.* Se emplean geófonos para medir las deflexiones, el equipo que se utiliza es el FWD (Falling Weigh Deflectometer), una ventaja que tiene es su habilidad para modelar adecuadamente las cargas circulantes del tránsito, tanto en magnitud como en duración; produciendo una deflexión causada por un vehículo en movimiento. Otras ventajas son su habilidad para medir el nivel de transferencia de carga en juntas y grietas; ya que detecta la presencia de oquedades, registra la cuenca de deflexiones y la velocidad con que pueden realizarse las pruebas; por lo que viene a ser el equipo más conveniente. Dentro de las versiones comerciales de este equipo se encuentran: el Dynatest, el KUAB, y el Phoenix FWD.
- *Medición continua de la respuesta ante la aplicación de una carga rodante también continua.* El aparato que se emplea es el RWD (Rolling Wheel Deflectometer), el cual mide deflexiones del pavimento continuamente y con buena precisión, utilizando sensores con base en rayos láser; sin embargo, aún se encuentran en desarrollo sus diferentes versiones actuales.

De alguna manera, el orden anterior de presentación señala la secuencia en que dichos métodos han sido desarrollados tecnológicamente y utilizados en la práctica de la conservación vial.

La tabla 5, muestra las características básicas de algunos equipos existentes de evaluación no destructiva de pavimentos; todos ellos pueden adquirirse desde México.

Tabla 5. Características básicas de equipos para la evaluación estructural no-destruictiva de pavimentos.

APARATO	TIPO DE UNIDAD	CARGA PRINCIPAL	SISTEMA DE CARGA	CARGA ESTÁTICA (kg)	FUERZA DINÁMICA (ibf)	CARGA TRANSMITIDA POR	DISPOSITIVO PARA LA LECTURA	MÉTODO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS
Viga Benkelman.	Operación manual.	Rueda en movimiento.	Camión cargado.	(a)	N / A	Ruedas de camión.	Manómetro.	Manual.
Deflectómetro Viajero de California.	Control automatizado.	Rueda en movimiento.	Camión cargado en movimiento.	(a)	N / A	Ruedas de camión.	Traductor de deflexiones.	Manual, impreso o automatizado.
Deflectógrafo La Croix.	Control automatizado.	Rueda en movimiento.	Camión en movimiento cargado con blocks o agua.	(a)	N / A	Ruedas de camión.	Traductor de deflexiones.	Manual, impreso o automatizado.
Dynalect.	Montado en remolque.	Vibración uniforme (frecuencia 8 Hz).	Vibración por rotación de masas.	953	1000	Dos ruedas de acero (diám. 40 cm) cubiertas de uretano.	5 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
Model 400 B Road Rater.	Montado en remolque.	Vibración uniforme (frecuencia 6 - 80 Hz).	Movimiento de masas por sistema hidráulico.	1090	200 - 3000	Dos blocks de 10 x 17.5 cm	4 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
Model 2000 Road Rater.	Montado en remolque.	Vibración uniforme (frecuencia 6 - 60 Hz).	Movimiento de masas por sistema hidráulico.	1589	200 - 5500	Plato circular (diám. 45 cm).	4 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
Model 2008 Road Rater.	Montado en remolque.	Vibración uniforme (frecuencia 5 - 80 Hz).	Movimiento de masas por sistema hidráulico.	3405	500 - 9000	Plato circular (diám. 45 cm).	4 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
KUAB '150 FWD.	Montado en remolque.	Impacto.	Caída de masas.	908	2700 - 11300	Plato circular (diám. 30 cm).	Más de 5 Sismómetros.	Manual, impreso o automatizado.

Tabla 5. Características básicas de equipos para la evaluación estructural no-destructiva de pavimentos

APARATO	TIPO DE UNIDAD	CARGA PRINCIPAL	SISTEMA DE CARGA	CARGA ESTÁTICA (kg)	FUERZA DINÁMICA (lbf)	CARGA TRANSMITIDA POR	DISPOSITIVO PARA LA LECTURA	MÉTODO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS
KUAB '50 FWD.	Montado en remolque.	Impacto.	Caída de masas.	908	2700 - 33700	Plato circular (diám. 30 cm).	Más de 12 Sismómetros.	Manual, impreso o automatizado.
Dynatest 8000 FWD.	Montado en remolque.	Impacto.	Caída de masas.	908	1500 - 27000	Plato circular (diám. 30 cm).	7 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
Dynatest 800 FWD.	Montado en remolque.	Impacto.	Caída de masas.	908	6500 - 19000	Plato circular (diám. 30 cm).	7 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
Phoenix ML 10000 FWD.	Montado en remolque.	Impacto.	Caída de masas.	863	2300 - 23000	Plato circular (diám. 30 cm).	3 o 6 Geófono.	Manual, impreso o automatizado.
CEBTP Curviometer.	Control automatizado.	Rueda en movimiento.	Camión en movimiento cargado con placa de acero.	(a) o variable.	N / A	Ruedas de camión.	1 Geófono.	Automatizado.

Los factores básicos que deben considerarse en la selección de un equipo determinado son:

- Las características operativas (capacidad de recolección y almacenamiento de datos, demoras causadas al tránsito, requisitos de calibración, facilidad para ser transportado y necesidades de capacitación de los operadores).
- La calidad de los datos (conveniencia, repetibilidad y precisión).
- La versatilidad (número de sensores, configuración y movilidad del sistema de sensores y rango de niveles de carga).
- El costo (inicial y por secuencia de pruebas).

V.4. MEDICIÓN DEL ISA.

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, puntos 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.

V.5. MEDICIÓN DEL IRI.

V.5.1. 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 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.

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. Esto se puede observar utilizando los métodos 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.

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. Éste se define como la relación entre el desplazamiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo y su

distancia recorrida. Se expresa en mm/m, en m/km, en in/mi, etc. Valores inferiores a 2 m/km representan una excelente rugosidad para todo tipo de camino.

Existe 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 permite, mediante un valor, medir la rugosidad de un camino. Debe 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 m, los perfilógrafos, etc., que miden la regularidad en el sentido longitudinal de la carretera.

Cada perfilógrafo registra, de manera particular, en forma gráfica, un perfil del camino detectado mediante una rueda registradora de acuerdo con el arreglo de las ruedas, la longitud y el 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 m, km, mi, etc.). El Índice de Perfil se expresa en unidades de cm/km, in/mi, etc. El perfilógrafo de Hveem, diseñado por el Departamento de Carreteras de California, es utilizado por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) para determinar el Índice de Perfil de las pistas, las plataformas y las zonas de rodaje en los aeropuertos mexicanos. Actualmente

se empieza a utilizar para el control de calidad en tramos de carreteras nuevas, como un parámetro de pago.

En la práctica es común expresar el Índice de Perfil en unidades inglesas.

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 tienen unidades similares (m/km, mm/m, in/mi, etc.), son parámetros diferentes; sin embargo, existe una correlación entre ambos para cada equipo.

Los denominados transversoperfilógrafos, 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, faltas de bombeo, etc.

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, que se utiliza en nuestro país (en México, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), la Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T. y algunas empresas privadas de control de calidad cuentan con este tipo de equipos, con lo que sería posible emprender un programa para la evaluación de carreteras en nuestro país de manera coordinada y permanente). 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.

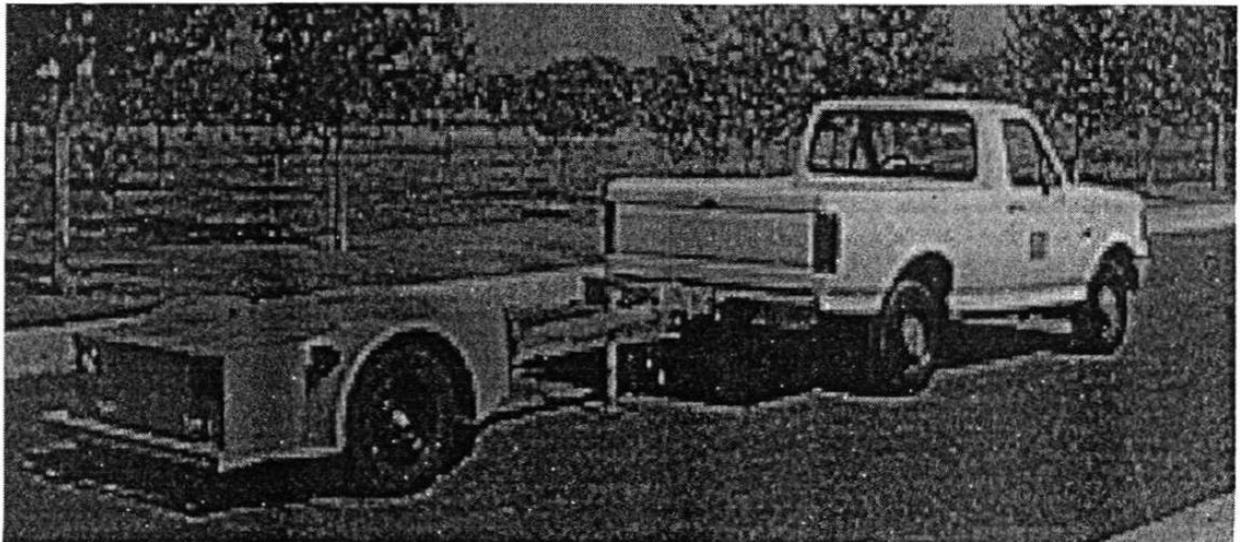


Figura 9. Equipo "Mays Ride Meter".

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. 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 en 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, la 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.

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 el caso contrario.

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 con la importancia del camino.

La forma de obtener el IRI es mediante el levantamiento topográfico del perfil longitudinal del camino, a un cierto intervalo de mediciones, 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.

Es importante evaluar la condición superficial mediante el monitoreo periódico y permanente de la red nacional de carreteras, con equipos automatizados debidamente calibrados (ver detalles del procedimiento de correlación del IRI con un equipo de tipo respuesta en el Apéndice A).

V.5.2. Niveles de rugosidad.

En los Estados Unidos, la Federal Highway Administration ha reportado que los intervalos típicos del IRI evaluados en diferentes tramos de carreteras están entre 0.8 a 4.7 m/km (50 y 300 in/mi). Los tramos de pavimentos con valores de menores de 2.4 m/km (150 in/mi) son considerados como superficies en buen estado y confortables, mientras que los valores de 4.7 m/km o más, son considerados como rugosos y no confortables.

En España, la Orden Circular 308/89C y E de 1989, fijaba el valor de 2 m/km como umbral para recibir una carretera. Más tarde, se modificó para admitir el IRI de 2.5 m/km en todo el tramo, siempre que en el 80% del tramo se alcance como máximo el IRI de 2, y debiendo alcanzarse además el IRI de 1.5 en la mitad del tramo. Actualmente se fija un valor de 1.85 de IRI para recibir nuevas carreteras. Para carreteras en servicio con una Intensidad Media Diaria (IMD) mayor de 2000 vehículos fijan un porcentaje de la longitud de calzada con un valor mínimo de 3.5 m/km y para valores de $IMD < 2000$ vehículos el IRI mínimo de 4.5 m/km.

En Chile, se considera un valor del IRI entre 0 y 3 m/km como un camino bueno, entre 3 y 4 como uno regular y para un IRI mayor que 4 m/km como un camino malo. Mientras que en Honduras su clasificación es la siguiente: para $IRI < 3.5$ m/km se considera el camino como bueno, entre 3.5 y 6 como regular y finalmente cuando el IRI es mayor que 6 m/km indica que el camino es malo.

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico.

En México es conveniente evaluar el Índice Internacional de Rugosidad en ciertos tramos para conocer el estado actual de la red y estimar el intervalo de valores en que se encuentran las carreteras y proponer una zona o umbral de alerta con respecto a la escala del IRI; esto permitirá conocer cuáles son los tramos que en ese momento requieren un estudio más detallado para conocer las causas de su deterioro para su reparación y a cuáles tramos, por ese año, no se les hará nada (tramos que no entran en esa zona). En tramos pavimentados de prueba, donde se han realizado cálculos del IRI, se observan valores comprendidos entre 1.6 y 8 m/km, siendo los más comunes y representativos, los tramos que resultaron con valores entre 3 y 6 m/km.

En el Apéndice B, se puede observar los resultados del estudio y establecimiento de criterios sencillos y homogéneos de evaluación del estado de redes de carreteras, según el Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica.

V.6. MEDICIÓN DEL IFI.

V.6.1. Medida de la adherencia neumático-pavimento.

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 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.

V.6.2. Medida de la textura.

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

- El método Volumétrico.
- La medida del Drenaje Superficial (drenómetros).
- La determinación del Perfil.

El Método Volumétrico, también conocido como el Método del Círculo de Arena, y que es utilizado y recomendado por las dependencias nacionales (IMT), 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, 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 (ver detalles de este procedimiento en el Apéndice C).

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.

V.6.3. 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.