

2012



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL:

**ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE PERFIL EN
TRAMOS CARRETEROS Y
ALGUNAS RECOMENDACIONES
PARA MEJORARLO**

AUTOR:

DOMINGO PÉREZ MADRIGAL

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. ENRIQUE S. DAHLHAUS PARKMAN



Agradecimientos

A mi Papa

Por haberme apoyado en todo momento para la terminación de mis estudios profesionales y por ser siempre el modelo a seguir tanto como papa, como profesionista.

A mi Mama

Por haberme dado siempre el apoyo psicológico para poder salir siempre adelante

A mis Hermanos y mi Familia

Por que han sido primordiales para mi formación como ser humano.



TEMARIO GENERAL

PREFACIO.

INTRODUCCIÓN.

I.- ANTECEDENTES.

II.- EL CONCEPTO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL EN MÉXICO.

III.- EL IMPACTO ECONÓMICO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.

**IV.- ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PERFIL EN ALGUNOS
TRAMOS CARRETEROS.**

V.- RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL ÍNDICE DE PERFIL.

VI.- CONCLUSIONES.



ÍNDICE TEMÁTICO

I. ANTECEDENTES.

I.1 LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA EN MÉXICO.

- CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA EN MÉXICO.
- NECESIDADES DE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE PARA LOS PROXIMOS AÑOS.

I.2 ORIGEN Y DESARROLLO DEL CONCEPTO DE SERVICIABILIDAD.

I.3 METODOS Y EQUIPOS DE EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DE UNA CARRETERA.

- INTRODUCCION.
- REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRREGULARIDAD EN EL RODAMIENTO).
- DAÑOS EN EL PAVIMENTO (ESTADO DE LA SUPERFICIE).
- DEFLEXIÓN DEL PAVIMENTO (FALLA ESTRUCTURAL).
- RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (SEGURIDAD).

II. EL CONCEPTO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL EN MÉXICO.

II.1 DESARROLLO DEL CONCEPTO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.

II.2 IMPORTANCIA, METODOS Y EQUIPOS PARA SU MEDICIÓN.

II.3 EL ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED NACIONAL DE CARRETERAS.

- ANTECEDENTES.
- DESARROLLO DEL CONCEPTO.
- ESCALA Y CARACTERÍSTICAS DEL IRI.
- VALORES COMUNES DE IRI EN ALGUNOS PAISES.

II.4 EL ÍNDICE DE PERFIL COMO MEDIDA DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.

II.5 ESTANDARIZACION Y CORRELACION DE LAS MEDICIONES DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.



- CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES EQUIPOS QUE MIDEN EL ÍNDICE DE PERFIL (IP).
- CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE INTERNACIONAL DE IRREGULARIDAD (IRI) Y EL ÍNDICE DE PERFIL (IP).

III. EL IMPACTO ECONÓMICO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.

III.1 COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR.

III.2 EL CONCEPTO DEL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA.

- INTRODUCCION.
- APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA.

III.3 COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR EN MÉXICO.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PERFIL EN ALGUNOS TRAMOS CARRETEROS.

IV.1 GENERALIDADES.

IV.2 EQUIPO UTILIZADO.

IV.3 ESPECIFICACIONES Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO.

- ESPECIFICACIONES.
- CALIBRACIÓN.

IV.4 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

IV.5 COSTOS DE OPERACIÓN EN TRAMOS ANALIZADOS.

V. RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL ÍNDICE DE PERFIL.

VI. CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.



PREFACIO

El tema de regularidad superficial en carreteras y autopistas ha sido considerado en México de manera discreta, la gran importancia económica que conlleva una buena calidad en la superficie de rodamiento, por el que transitan los vehículos ya sea de carga o de pasajeros, también se sabe que a partir de investigaciones realizadas por prestigiadas instituciones internacionales, la menor velocidad de deterioro que presentan los pavimentos durante su vida útil, es cuando estas se construyen con mejores regularidades superficiales.

En México, 2 de los parámetros que se utilizan con mayor frecuencia para la evaluación de la regularidad superficial en carreteras, lo constituyen el Índice Internacional de Irregularidad (IRI) y el Índice de Perfil (IP); Se ha decidido en éste trabajo determinar el parámetro del Índice de Perfil debido a su alto rendimiento con el cual se determina y también porque la Secretaria de Comunicaciones y Transportes a través de su Normativa utiliza éste parámetro en la evaluación de caminos nuevos o reconstruidos, para fines de entrega o recepción de dichos trabajos.

La finalidad de éste trabajo es visualizar los aspectos más relevantes que influyen en la regularidad superficial en una carretera y tratar de que las empresas ejecutoras de los trabajos de construcción, así como los de conservación, puedan aplicar técnicas que se han demostrado que son de gran ayuda en la mejora de alcanzar una buena regularidad superficial.

De los tramos evaluados, 3 tramos en el que se analizó la regularidad en ésta investigación, es importante destacar que 2 tramos fueron parte del Programa Nacional de Conservación de carreteras del año 2010 y uno fue parte del Programa Nacional de Construcción y Modernización de Carreteras, éste último dentro del Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012. Todos estos trabajos fueron realizados en el estado de Campeche.



En los 3 tramos de carreteras en los cuales se analizó el parámetro del índice de perfil, se compararon los valores de los resultados obtenidos con respecto a los límites mostrados en la Norma establecida por la SCT y, de igual manera, se realizó un análisis estadístico y se mostraron cuales tramos pueden cumplir con dicha normativa.

En el capítulo I se describe como está distribuida la red nacional de carreteras para ver el panorama actual y lo que está proyectado para un periodo de 20 años, también se describe los principales métodos usados hoy en día para evaluar el estado superficial, esta información es importante para poder visualizar de manera general de donde parte la regularidad superficial

En el capítulo II se explica el concepto de regularidad superficial en general y su influencia en todo el mundo, después se explica detalladamente los parámetros más importantes como el IRI (Índice de Regularidad Internacional) y El Índice de Perfil.

En el capítulo III se caracteriza en definir los costos de operación como concepto y después se muestra, a través de investigaciones llevadas a cabo por el Instituto Mexicano del Transporte, la influencia de estos costos en México.

En el capítulo IV se presentan los análisis del índice de perfil en tramos de la red nacional de carreteras donde se hizo el levantamiento de éste, y se hace un análisis estadístico en el cual se muestra cuales tramos cumplen con la Norma SCT, también se muestra un análisis de costos de operación en los tramos donde se levantó el IP.

En el capítulo V se describe los principales factores que afectan la regularidad superficial y se enuncia recomendaciones para mejorar el índice de perfil.



INTRODUCCIÓN

La superficie de rodadura de un pavimento constituye una de las partes más importantes de la ingeniería de carreteras, tanto del punto de vista técnico como en el económico. También, la superficie de rodadura, es importante desde el aspecto de valoración de los usuarios, que mayoritariamente califican a la carretera por el estado de la superficie de rodamiento.

Desde el punto de vista general, la superficie de rodadura debe ser cómoda, segura, duradera, poco ruidosa, producir un desgaste mínimo en los neumáticos de los vehículos y debe facilitar la evacuación del agua (cuando existe) en la zona de contacto con el neumático.

Debido a lo dicho anteriormente, en México se ha estado tomando en cuenta éste parámetro para determinar factores, tanto para la recepción de obra nueva en pavimentos como para la evaluación de las redes de carreteras con fines de administración de las mismas.

Es importante señalar que dicha importancia ha sido tomada en cuenta por instituciones gubernamentales como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que, a través de su Normativa actual, nos indican procedimientos para evaluar la regularidad superficial.

Existen diversos métodos y parámetros para definir la regularidad superficial en un pavimento; así mismo, existe todavía desconocimiento del tema por parte de diversos administradores de redes de carreteras en los diferentes niveles federales, estatales o municipales, creando muchas controversias y confusiones e incluso la falta de aplicación de las normativas correspondientes por el mismo desconocimiento de los conceptos de regularidad superficial.



Los niveles de aceptación de la superficie de rodadura han ido aumentando en forma continua. Por una parte se debe a las necesidades de exigencias propias del transporte moderno, por otra parte a los avances de la industria automovilística.

Para éste propósito, se ha tenido que desarrollar tecnología específica, relativa a la investigación de las características superficiales que directamente afectan a los aspectos funcionales del pavimento y su relación a la interacción entre pavimento-vehículo usuario.

Se ha analizado también que en una construcción o reconstrucción en la capa superior de un pavimento, y fundamentalmente en la terminación de la superficie de rodamiento, permitirá que los costos país sean mayores o menores. Lo anterior se generará desde el momento en que se ponga en operación el tramo, así como de los incrementos a lo largo de la vida útil del mismo.



CAPÍTULO I. --- ---

ANTECEDENTES

I.1.- LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA EN MÉXICO

CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA EN MÉXICO.

La inversión en infraestructura es importante para incrementar la productividad y competitividad económica y no debe posponerse, pues no se puede alcanzar un desarrollo de primer mundo con una infraestructura del tercero, por lo que es necesario igualar o superar estándares de los países competidores.

Las carreteras son la infraestructura de la infraestructura, ya que una vez que se construye una de ella, es más fácil proporcionar el resto de los servicios, por eso hacer carreteras contribuye de manera tan importante con el desarrollo del país.

Uno de los aspectos de más importancia será el buen desarrollo de la infraestructura carretera, aplicando una combinación de recursos humanos, materiales y económicos.

Sin lugar a dudas, aún cuando se ha seguido invirtiendo en la infraestructura carretera de nuestro país, estas inversiones han ido paulatinamente decreciendo del orden de un 7.6 % anual en pesos constantes. Es necesario tomar en cuenta también que hay un rezago en nuestro país en cuanto a la calidad de la infraestructura carretera, según el foro económico mundial estamos actualmente en el lugar 49 a nivel mundial.

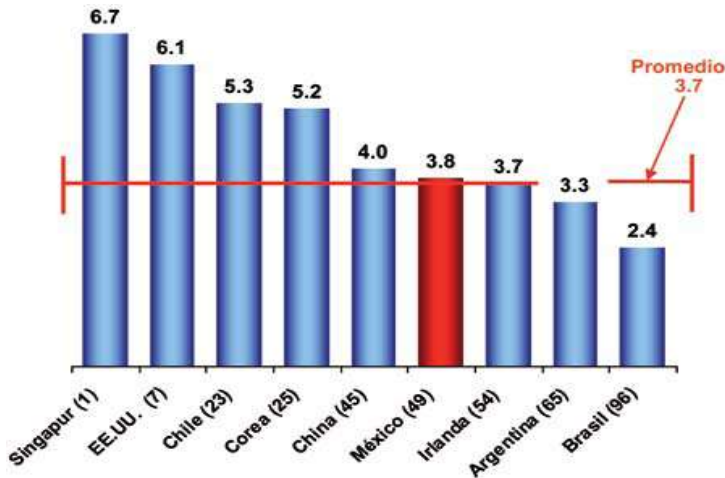


Fig. I.1.- Calidad de infraestructura escala de 1 "poca desarrollada" a 7 "de las mejores del mundo" (Fuente: foro económico mundial 2006).

Lo que conlleva a las autoridades competentes a buscar ser más eficientes en cuanto a la optimización de recursos, buscando para ello la aplicación de nuevas tecnologías y estrategias con las cuales se puedan construir más carreteras y se puedan conservar adecuadamente las existentes al nivel de nuestros socios comerciales del TLC.

La red de carreteras nació y se desarrolló a principios de siglo con el objetivo básico de integrar el país, fase que aún no termina. Sin embargo, actualmente se requiere que el transporte opere con base en otros parámetros de eficiencia. El sistema de transporte mexicano depende fundamentalmente de la red de carreteras.

¿Por qué de la red de carreteras? Porque a través de la red de carreteras fluye el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y aproximadamente el 98% del movimiento de pasajeros y ha sido uno de los elementos básicos para la transformación y desarrollo del país.

Ante estos hechos, el funcionamiento de las carreteras resulta clave para la vida económica y social de la nación, por lo cual México ha dedicado desde hace muchos años importantes esfuerzos a la extensión, preservación y modernización de su red carretera.



Fig.I.2.- Trabajos de conservación de carreteras mediante tendido de sobre carpeta asfáltica (Fuente: SCT).

La infraestructura física de nuestro país, en términos generales, es la siguiente: la red carretera nacional está constituida por cerca de 366,341.46 mil kilómetros (Fuente: Subsecretaría de Infraestructura 2011, SCT).

De acuerdo al tipo de red, está constituida por:

48,660.00	Kilómetros de carreteras federales y autopistas.
77,964.14	Kilómetros de caminos alimentadores o estatales.
239,717.32	Kilómetros de caminos rurales y brechas

366,341.46 km.

Uno de los elementos más importantes de la red carretera, lo constituyen los 14 corredores carreteros que interconectan las cinco meso regiones en que se divide el país con una longitud total de 19,245.3 kilómetros.

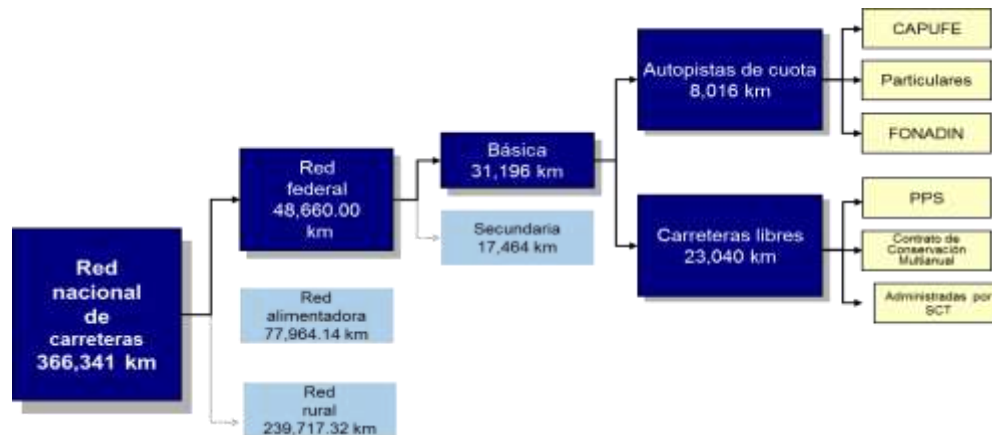


Fig.1.3.- Cuadro explicativo de la red nacional de carreteras (Fuente: elaboración propia con datos de la SCT).

Es importante mencionar que los pavimentos existentes en nuestro país son en la mayoría tipo flexible, aunque actualmente existen alrededor de 4,500 km de pavimento rígido.

Algunas de las causas fundamentales de los problemas de la situación actual de las carreteras en México son las siguientes: aproximadamente el 53 % de la red tiene más de 30 años y solamente 16% tiene menos de 15 años ; 21% soporta tránsitos diarios de más de 5,000 vehículos y solamente 61% se encuentran en estado de regular a bueno.

Es evidente que los pavimentos que tienen más de 30 años se hicieron con criterios de diseño, especificaciones y materiales diferentes a los exigidos hoy en día.

Los volúmenes de tránsito que circulan hoy por la red federal son mucho mayores a los previstos en su diseño original y los porcentajes de vehículos pesados se han incrementado hasta en 50% en algunos tramos.

En los programas anuales de conservación, las asignaciones presupuestales son siempre insuficientes para cubrir las necesidades y en ocasiones se aplican de manera excesiva en múltiples frentes de trabajo y con la falta de una estrategia general que contenga programas de mediano y largo plazo para el mejoramiento de las carreteras, que permita una inversión en mantenimiento y reconstrucción sostenida durante un periodo aproximado de 15 años.



NECESIDADES DE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE PARA LOS PROXIMOS AÑOS.

En las últimas décadas del siglo anterior, era común señalar las metas que en varios rubros de la infraestructura necesitaban ser alcanzadas para llegar a determinados niveles de desarrollo económico.

Hoy en día la sociedad y el gobierno de México ha avanzado paulatinamente, pero firmemente en el diseño de ese futuro, primero a corto plazo a través del Plan Nacional de Desarrollo 2006-2012, en el cual se formularon las estrategias generales para los próximos seis años. También se planearon estrategias a largo plazo tal como el Proyecto de Gran Visión “México 2030”, se estableció un horizonte de planeación de largo plazo en torno a una visión del México que se quiere tener.

Ahora bien, dentro de las estrategias basadas en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2012, en particular, se mencionan a continuación las estrategias de la infraestructura carretera más importantes:

- a) Completar la modernización de los corredores troncales transversales y longitudinales que comunican a las principales ciudades, puertos, fronteras y centros turísticos del país con carreteras de altas especificaciones tal y como se muestra en la Figura I-4, mostrada a continuación.
- b) Desarrollar ejes interregionales, que mejoren la comunicación entre regiones y la conectividad de la red carretera.
- c) Dar atención especial a la construcción de libramientos y accesos para facilitar la continuidad del flujo vehicular.
- d) Mejorar el estado físico de la infraestructura carretera y reducir el índice de accidentes.



En el actual contexto del país, México no puede rezagarse, deberá hacer el mayor esfuerzo del que sea capaz para ocupar el lugar que le corresponde dentro de la dinámica del cambio mundial.

Por lo anterior, es importante mencionar algunos de los requerimientos más importantes de la infraestructura carretera para las próximas dos décadas; basándose en el proyecto de gran visión ‘México 2030’ y, tomando como referencia el año 2010, se menciona lo siguiente: Dentro del ámbito de las carreteras, la red pavimentada deberá alcanzar los 150,000 km y se requerirán alrededor de 12,000 km adicionales de autopistas y carreteras de altas especificaciones. Deberá de incrementarse la inversión destinada a la conservación y modernización de la red. Se deben diseñar las carreteras con las especificaciones requeridas para garantizar su durabilidad, seguridad y economía, utilizando materiales y productos con especificaciones que tomen en cuenta su comportamiento a largo plazo.

Las carreteras que ya existen deberán reforzarse y ampliarse para dar cabida al volumen de tránsito, principalmente, pesado ya que estos son los que producen mayores esfuerzos y en consecuencia mayor deterioro en las vías terrestres.



Fig. I.4.- Los principales ejes troncales de México proyectado para el 2012 (Fuente: SCT).



I.2.- ORIGEN Y DESARROLLO DEL CONCEPTO DE SERVICIABILIDAD

La satisfacción de los usuarios se manifiesta, fundamentalmente, por la calidad en que se encuentran los pavimentos, principalmente, la capa de rodadura y los elementos que constituyen la seguridad vial. Los pavimentos que experimentan un deterioro relativamente acelerado son los que requieren la mayor inversión, por lo que, con el desarrollo masivo de las carreteras pavimentadas, las entidades responsables de la conservación debieron plantearse las interrogantes de cuando intervenir y de cómo medir el nivel de deterioro.

Existen, en la actualidad, diversos indicadores que permiten establecer la calidad del servicio que se presta o, como se le denomina, Serviciabilidad. Parte fundamental de la definición de los niveles de serviciabilidad es establecer valores que corresponderían a serviciabilidades extremas, es decir, a un pavimento nuevo y a uno que resulta prácticamente intransitable. Todos los indicadores existentes tienen en común la preponderancia de las irregularidades por sobre todos los otros factores utilizados en el cálculo de tales indicadores (grietas, ahuellamientos, deformaciones, etc.).

Los criterios más modernos sobre serviciabilidad comprenden aspectos que guardan relación con el deterioro funcional del pavimento, la capacidad estructural del pavimento y la seguridad de los usuarios.

La serviciabilidad funcional del pavimento interpreta la percepción de la calidad de la superficie de rodadura que experimenta el usuario; por lo tanto, se relaciona fundamentalmente con la rugosidad o, más exactamente, con la regularidad que presenta la superficie y que, en una carretera bien diseñada y bien construida, es el principal factor que define el nivel de la serviciabilidad funcional que presta. Aún cuando para el técnico especialista las tres condiciones señaladas en el párrafo anterior son importantes, y de muchas maneras están ligadas entre sí, no se debe olvidar que las carreteras tienen por



finalidad servir al público y que a éste, fundamentalmente, le interesa la condición funcional y la seguridad.

La serviciabilidad estructural representa la condición física en que se encuentra el pavimento; depende de las grietas y otras fallas presentes que afectan adversamente la capacidad para soportar el tránsito a que debe servir.

La seguridad es un concepto de más reciente incorporación a la serviciabilidad y guarda relación con la disposición, calidad y cantidad de elementos de seguridad, y con un adecuado diseño vial.

La AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), fue la primera organización en sistematizar un procedimiento objetivo para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos, procurando relacionar la condición funcional con la estructural. Introdujo para ello el concepto de serviciabilidad, derivado de una encuesta efectuada en la década del 60 entre usuarios de carreteras en los Estados Unidos. Los pavimentos en esa encuesta fueron calificados con notas cuyos valores extremos variaban desde 0, para un camino intransitable, hasta 5 para una superficie en perfectas condiciones. Los resultados de la encuesta fueron luego correlacionados con el estado real de deterioro que presentaban los pavimentos evaluados, ligando de esta manera la condición funcional con la estructural y convirtiéndolo, así, en un indicador objetivo, cosa que en la actualidad no es posible relacionar.

La serviciabilidad fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado. Por otro lado, para evaluar la calidad de la superficie de las carreteras en México, durante muchos años, se utilizó el método desarrollado en los años 60's por la ya mencionada AASHTO, el cual toma en cuenta un parámetro denominado Valor Presente de Serviabilidad (Present Serviability Rating, PSR), éste método es 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 realiza un grupo o panel de evaluadores.

En el método ISA, 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.

CALIFICACIÓN	CONDICIÓN SUPERFICIAL
5	Excelente
4-5	Muy buena
3-4	Buena
2-3	Regular
1-2	Mala
0-1	Muy mala

El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores.

Este método ayudó a estimar de una manera subjetiva las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en nuestro país, con rapidez y sin interrumpir el flujo de vehículos. Este método tuvo gran difusión, debido también a que no se contaba con equipos de alto rendimiento para medición de la rugosidad en la superficie de rodamiento.

Sin embargo, actualmente, 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).



I.3.- MÉTODOS Y EQUIPOS DE EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DE UNA CARRETERA

INTRODUCCION

La evaluación de pavimentos proporciona la información para los programas de inversión y mantenimiento, fases dentro del sistema de administración de pavimentos mediante las cuales se determinan las diferencias en secciones de pavimentos y por esta razón se identifican las necesidades de rehabilitación.

En el caso de pavimentos nuevos, la información procedente de la evaluación sirve como retroalimentación para el diseño y la construcción de mejores pavimentos. Es por esta razón que la evaluación es esencial para una buena administración de pavimentos, ya que está íntimamente ligada con todas las fases: inversión/programación, diseño, construcción, mantenimiento e investigación.

El nivel o el grado de detalle en la frecuencia en las mediciones de evaluación dependen de cada situación en particular y de los requisitos del departamento encargado de una red de carreteras.

La medición de las características de un pavimento y la evaluación de los datos tienen como propósito los siguientes objetivos:

- Verificar si la función y el comportamiento esperado se ha logrado.
- Proporcionar la información para la planeación de la rehabilitación.
- Proporcionar la información para mejorar las técnicas de diseño, construcción y mantenimiento.



Pueden existir un gran número de factores que afectan en forma sencilla combinada la velocidad de deterioro de un pavimento, consecuentemente va afectando el servicio que presta a los usuarios.

Estos factores generalmente pueden ser englobados en las siguientes clases:

- Factores del tráfico.
- Factores de clima y/o medioambiente.
- Espesor de las capas de la estructura del pavimento.
- Características de las diferentes capas que constituyen el pavimento y las características de la sub rasante.
- Factores de construcción.
- Factores de mantenimiento.

A pesar de que no se puede tener control sobre todos los factores mencionados con anterioridad, éstos deben ser considerados dentro de un sistema de administración de pavimentos.

Para evaluar las necesidades de rehabilitación de un pavimento se usan 4 características del estado del mismo:

- 1) Regularidad superficial (Irregularidad en el rodamiento).**
- 2) Daños en el pavimento (Estado de la Superficie).**
- 3) Deflexión del pavimento (Falla estructural).**
- 4) Resistencia al deslizamiento (Seguridad).**



REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRREGULARIDAD EN EL RODAMIENTO)

La rugosidad o regularidad superficial del pavimento se refiere a las irregularidades del mismo, que afectan la uniformidad de conducción de un vehículo.

Éste tema se profundizara más en capítulos posteriores.

DAÑOS EN EL PAVIMENTO (ESTADO DE LA SUPERFICIE)

El término “daño en el pavimento” se refiere al estado de la superficie de un pavimento con relación en su apariencia general. Un pavimento perfecto tiene una superficie continua sin roturas; en contraste, un pavimento dañado puede estar fracturado, distorsionado o desintegrado.

Estas últimas 3 categorías básicas se pueden seguir subdividiendo; por ejemplo, las fracturas se pueden considerar como grietas o fracturas de la superficie de rodamiento. Las grietas pueden describirse como generalizadas, transversales, longitudinales, estrelladas o en bloque.

Una distorsión del pavimento se puede poner en evidencia debido a baches o el corrugado de la superficie de rodamiento. La desintegración del pavimento se puede observar como desmoronamiento o pérdida de la estructura del pavimento desde la subbase y acabado de la superficie.



Fig.I.5.- Grietas, baches y desgranamiento de un pavimento (Fuente: SCT).

DEFLEXIÓN DEL PAVIMENTO (FALLA ESTRUCTURAL)

La adecuación estructural del pavimento se mide ya sea con métodos no destructivos, donde se mide la deflexión bajo cargas estáticas o dinámicas, o con pruebas de falla que consisten en obtener especímenes de tramos de pavimentos y probarlos en el laboratorio.

La evaluación no destructiva se basa en la premisa que las mediciones se pueden hacer sobre la superficie del pavimento, y que a partir de estas mediciones *in situ* se pueden inferir características acerca de la adecuación estructural del pavimento.

La medida de la deflexión superficial, es un método importante de la evaluación del pavimento porque la magnitud y la forma de la deflexión del pavimento es una función del tráfico (tipo y volumen), de la sección estructural del pavimento, de la temperatura y de la humedad que afectan a la estructura del pavimento.

Los tres métodos básicos de prueba no destructiva son:

- Mediciones de deflexión estática.
- Mediciones de deflexiones debidas a carga dinámica o repetida.
- Mediciones de deflexiones debidas a cargas de caída libre (cargas por impacto).



***Mediciones de deflexión estática ***

Uno de los métodos de los que aún se usa en forma extensa en México para medir deflexiones estáticas es la Viga Benkelman, llamado así en honor al Ing. A. C. Benkelman, quién la desarrollo en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la ASSHO Road Test. Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

La viga de Benkelman se utiliza con un camión, generalmente, cargado aproximadamente a 80 kN (18,000 libras, 8,164 kg) en un eje sencillo con neumáticos duales inflados a una presión de entre 480 a 550 kpa (70 a 80 PSI).

La descripción del método de prueba con la Viga Belkelman se encuentra en las especificaciones:

- AASHTO T 256: Medidas de la deflexión del pavimento.
- ASTM D 4695: Medidas generales de la deflexión de un pavimento.



Figura I-6.- Medición de deflexiones con Viga Benkelman (Fuente: Camineros.com).



Mediciones de deflexiones debidas a carga dinámica o repetida

El método más común es de la carga dinámica para medir deflexiones de un pavimento es el método de la empresa Dynaflect, que consiste básicamente en un generador dinámico de fuerza cíclica montado en un remolque de 2 ruedas, una unidad de control, un sensor ensamblado y una unidad calibrador del sensor.

Éste método proporciona mediciones rápidas y precisas de la carpeta, que en esta prueba se deben a fuerzas generadas por volantes desbalanceados que giran en direcciones contrarias. Se produce una fuerza vertical de 1,000 lb (453.59 kg) en las ruedas de carga y las deflexiones se miden en 5 puntos sobre la superficie del pavimento y a 1 pie (30.48 cm) de distancia.



Fig.I-7.- Dynaflect en la medición de deflexiones dinámicas (Fuente: camineros.com).

El equipo esta inmóvil cuando las medidas se toman con el generador de fuerza (contador giratorio de pesos) encendido y los sensores de medición de la deflexión (transductores) bajados a la superficie del pavimento. En la figura I.8, que se presenta a continuación, se muestra un diagrama de la fuerza típica de salida de éste equipo.

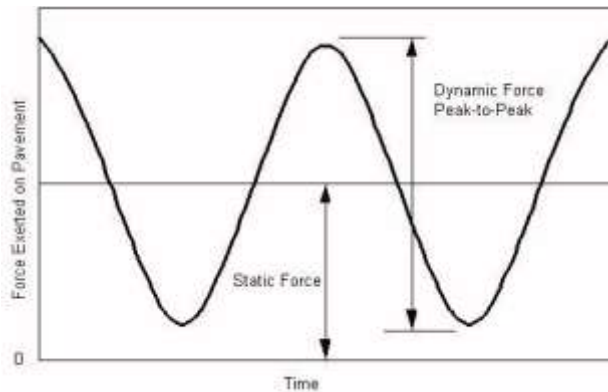


Fig. I.8.- Diagrama de salida de fuerza del Dynaflect.

Mediciones de deflexiones de cargas de caída libre (cargas por impacto)

Todos los equipos de medición por carga de impacto entregan una carga transitoria de impulso a la superficie del pavimento. La respuesta subsecuente del pavimento es medida por una serie de sensores.

Conocido generalmente como "deflectómetro de peso por impacto" (Fallig Weight Deflectometer) por sus siglas en inglés, FWD, se encarga de crear un impulso de carga sobre el pavimento, dejando caer una masa a partir de alturas variables sobre un sistema de resortes o caucho.

Existen 3 tipos de FWD que son:

El Dynatest, Jils y Kuab.



Fig. I.9.- Falling Weight Deflectometer (Fuente: Dynatest).



La primera ventaja es que el sistema de aplicación de la carga se parece mucho al de las cargas dinámicas producidas por los vehículos reales que afectan y dañan a la carretera. La escasa duración del impacto (del orden de 20/30 milisegundos) se aproxima bastante al efecto de un vehículo circulando a 60 ó 70 km/h.

La segunda ventaja es que mediante los **FWD** se mide también lo que sucede en los alrededores del punto de carga (normalmente se mide en 6, 7 ó 9 puntos situados secuencialmente a distancias entre 20 cm y 180 cm del punto de impacto). Estas deflexiones asociadas permiten estudiar la superficie de rodamiento en su concepto de estructura multicapa (serie de capas de varios espesores y módulos).

La tercera ventaja de un equipo de medición de respuesta a la carga por impacto sobre un equipo de medición de la deflexión en estado fijo, es que la medida se realiza más rápidamente, la carga de impacto puede ser variada fácilmente.



Fig. I.10.- Falling Weight Deflectometer (Fuente: Kuab).

La descripción del método de prueba de éste equipo, se encuentra descrito en la especificación.

- ASTM D 4694: Método de prueba estándar para la medición de Deflexiones con Falling Weight Deflectometer.



Fig. I.11.- FWD (Fuente: Jils).

RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (SEGURIDAD)

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

Las cualidades de fricción en el pavimento juegan un papel importante dentro de la seguridad en carretera. La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático – pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos.

La información relacionada con la resistencia al deslizamiento es recolectada para evaluar la eficiencia que tiene un pavimento para evitar o reducir los accidentes relacionados con el deslizamiento o fricción. El coeficiente de fricción al deslizamiento, entre una rueda y el pavimento depende de factores como las condiciones climáticas, la textura del pavimento, el estado del neumático y la velocidad.



La fórmula básica del coeficiente de fricción es

—

Dónde:

f = coeficiente de fricción.

L = Fuerza lateral o de fricción necesaria para hacer que 2 superficies se muevan en dirección tangencial entre sí.

N = Fuerza perpendicular entre 2 superficies.

El dispositivo más común para medir el coeficiente de fricción en carreteras es el **Mu-meter** que se básicamente se tira de un remolque en una línea recta sobre una superficie mojada, con ambas ruedas frenadas e inclinadas. Esta prueba es conocida también como Dynamic Friction Tester (Prueba de Fricción Dinámica) trata de simular las condiciones de un vehículo en movimiento en condiciones críticas, tales como en un pavimento mojado, el vehículo éste frenando y en zona de curvas, que son las condiciones cuando se presenta la mayor causa de accidentes debido a éste parámetro.



Fig.I.10.- Mu meter en prueba de fricción dinámica (Fuente: Constructora Cien.com).



Según la Norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes denominada como, N.CSV.CAR.3.02.005/06, la resistencia a la fricción **debe ser igual o mayor a seis décimas (0.60)**, medida con el Mu-meter a una velocidad promedio de 75 Km/hr, por lo menos en la huella de la rodada externa de cada línea de tendido. El contratista hará esta verificación mediante el método utilizado para la medición del Índice de Fricción, indicado en la norma ASTM E 670 “**Método Estándar de Prueba Fuerza de Fricción Lateral en Superficies Pavimentadas Utilizando el Mu-Meter**”.



CAPÍTULO II. ---

EL CONCEPTO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL EN MÉXICO

II.1.- DESARROLLO DEL CONCEPTO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL

La regularidad o superficial viene determinada por la geometría del perfil longitudinal, que influye de manera muy importante en la seguridad, la comodidad de los usuarios y en la economía de la conservación de pavimentos.

La seguridad en un pavimento suele disminuirse cuando existen problemas de regularidad superficial y/o poca resistencia al deslizamiento del mismo; estos son 2 parámetros tomados para la evaluación superficial en un pavimento.

En México no ha sido práctica común la rehabilitación de caminos por problemas de regularidad superficial. Esta situación está cambiando y cada vez se le da mayor importancia a esta característica, porque tiene influencia sobre los tres actores que intervienen en el tránsito.

- Vehículos
- Usuarios
- Carretera



En efecto, una mala regularidad superficial produce movimientos verticales del vehículo, que pueden verse incrementados por unas aceleraciones verticales según la forma de las irregularidades. Estos movimientos indeseables producen, en el vehículo, un desgaste mecánico anormal, un mayor consumo de combustible y una disminución de la adherencia del vehículo con el pavimento.

Para los ocupantes del vehículo significan una incomodidad, que pueden afectar en mayor o menor medida la seguridad como consecuencia del cansancio, especialmente del conductor y la pérdida de la atención necesaria en el manejo del vehículo. Esta circunstancia es tanto más grave cuanto mayor sea la velocidad del vehículo.

La sensación de comodidad de los ocupantes del vehículo depende de las aceleraciones experimentadas para frecuencias determinadas. Estudios realizados han demostrado que la incomodidad producida a los usuarios por los movimientos inducidos debido a las irregularidades de la superficie del pavimento, dependen de las aceleraciones que producen estas irregularidades y de las frecuencia de los movimientos de tipo oscilatorio que se genera.

Las frecuencias más molestas por los ocupantes de los vehículos están comprendidas entre 2 y 5 Hz. En estas frecuencias, aceleraciones comprendidas entre 0.4 y 1 producen sensaciones molestas para los viajeros. Aceleraciones superiores a 2 producen desordenes físicos en los usuarios del vehículo. Estos movimientos verticales producen acciones dinámicas que incrementan las cargas estáticas verticales de los vehículos que pueden reducir de manera considerable la vida útil de un vehículo, exigiendo inversiones en conservación superior y con más frecuencia.



Fig. II.1.- Perfil exagerado de una carretera (Fuente: Pagina Web de Dynatest).

Para valorar las características superficiales, en primer lugar se analiza si las características son generalizadas (corresponden a un tramo definido y de cierta longitud) o localizadas (específicas en una zona puntual). Como ejemplo, podemos considerar el tipo de pavimento de un tramo como una característica generalizada. La existencia de una depresión sería una característica localizada.

Las características superficiales generalizadas se clasifican en función de las dimensiones de las irregularidades superficiales, asimilándolas a ondulaciones definidas por su tamaño (longitud de onda y amplitud de la irregularidad).

Las características superficiales de un tramo de carretera recién construido son, en condiciones normales, homogéneas y, por lo tanto, se trata de una generalizada. Con el paso del tiempo y el uso del pavimento, pueden aparecer defectos puntuales que deben de ser estudiados como características localizadas. En efecto, las características generales por pequeñas que sean, normalmente se pueden medir fiablemente usando procedimientos estadísticos aplicados sobre el área de análisis. Las características localizadas sólo se miden fácilmente si se extienden sobre un área relativamente grande. Los pequeños defectos puntuales son los más difíciles de medir, pero también los más sencillos de corregir.



El análisis de las características superficiales de un pavimento se realiza principalmente mediante la medida e interpretación del perfil longitudinal.

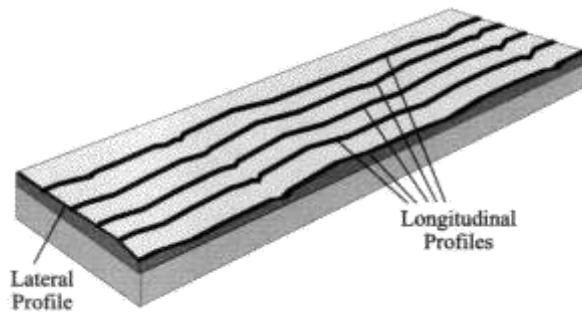


Fig.II.2.- Diferencia entre perfil transversal y el perfil longitudinal (Fuente: Camineros.com).

Existen criterios aceptados internacionalmente para esta valoración, siendo el más conocido el del comité de características superficiales de APIARC (Asociación Mundial de Carreteras) que establece, en función de la amplitud y de la longitud de onda de la regularidad, la clasificación siguiente:

Tipo de Textura y de regularidad		Rango de Medida	
		Longitud de onda	Amplitud
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 medias	5-15 m	5-50 mm
	Ondas largas	15-50 m	10-200 mm

Fig.II.3.- Tipo de textura y de regularidad (Fuente: Elaboración propia con datos de la APIARC).

La microtextura y la macrotextura intervienen de manera determinante en la seguridad vial, por su influencia, en los accidentes por pérdida del control del vehículo a causa del deslizamiento del mismo sobre el pavimento.



La megatextura y las ondas cortas intervienen fundamentalmente en crear una sensación de incomodidad al usuario, que influye en la seguridad vial por el riesgo de producirse un accidente al perder, el conductor, la debida concentración por incomodidad para conseguir la correcta conducción del vehículo.

Las ondas pequeñas, medias y largas producen un movimiento ondulante del vehículo al desplazarse por la carretera que, a ciertas velocidades, podría llegar a generar un cierto despegue de las llantas con el pavimento, con el consiguiente riesgo de accidente que ello significa.

Así pues, según la APIARC, las deformaciones con longitudes de onda comprendidas entre 0.5 y 50 metros son las que más afecta a la regularidad superficial de una carretera. Entonces, si la irregularidad superficial queda definida como la diferencia entre las cotas teóricas y las cotas reales del perfil longitudinal de una superficie de rodamiento, estas diferencias de cotas o irregularidades se pueden haber producido durante el proceso constructivo de la carretera ó como consecuencia de la evolución de la carretera en el tiempo por el paso de los vehículos.

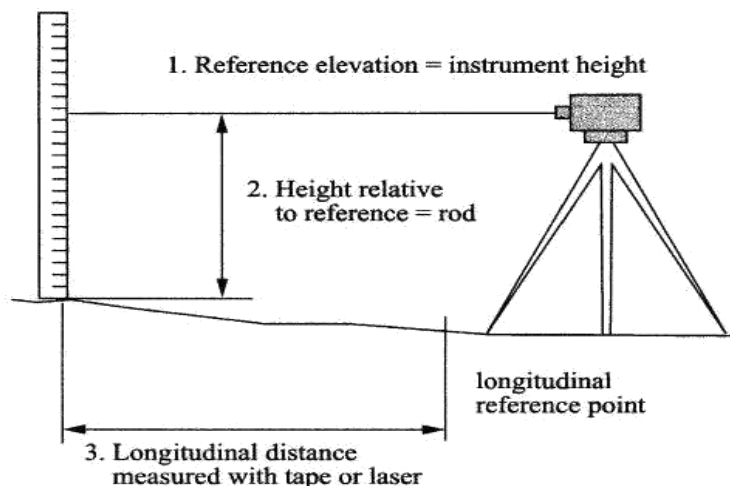


Fig.II.4.- Diferencia de cotas del perfil longitudinal para explicar el concepto de regularidad superficial (Fuente: Asociación española de la carretera).



II.2.- IMPORTANCIA, MÉTODOS Y EQUIPOS PARA SU MEDICIÓN

Es importante medir la regularidad superficial de una carretera porque afectan a la comodidad y la seguridad del usuario (influye en la accidentabilidad de la carretera), afecta al vehículo, produciendo un desgaste mecánico anormal, mayor consumo de combustible y peor adherencia del mismo al pavimento, provocando que se eleven los costos de conservación y operación del mismo.

Los equipos para la evaluación de la rugosidad pueden ser clasificados en cinco grandes categorías, tales como:

- Nivel y estatal.
- Equipos Dipstick.
- Equipos de tipo respuesta.
- Perfilografos de rueda sensible.
- Perfilografos inerciales o de alto rendimiento.

Nivel y estatal

Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión, graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o pies), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal. Las evaluaciones llevadas a cabo por una brigada de topografía pueden proporcionar una medición precisa del perfil del pavimento. El uso de éste tipo de estudios para grandes proyectos es impráctico y de costo demasiado alto.



Fig. II.5.- Nivel y estadal usadas en topografía de carreteras (Fuente: stonex.com).

Dipstick

El Dipstick (Digital Incremental Profiler) es un equipo electrónico que mide la inclinación o la diferencia de nivel existente entre dos puntos separados una distancia conocida, generalmente 300 mm.

Con ellos se consiguen precisiones mejores de 0,10 mm. Estos equipos van equipados con un pequeño ordenador con capacidad suficiente para almacenar las medidas realizadas y efectuar los cálculos necesarios.

Éste dispositivo es manual y puede ser operado por sólo una persona y es posible alcanzar rendimiento de 200 m/día y funciona de la siguiente manera: el operador camina con el equipo hacia abajo para colocarlo en la sección previamente marcada para la medición sobre el pavimento, alternadamente pivoteando el equipo con referencia a cada pata. Las lecturas son registradas secuencialmente a medida que el operador transversa la sección.

Una de las ventajas que tiene éste dispositivo es que procesa un perfil de una carretera a través de un programa de cómputo que se encarga de analizar y proporcionar un perfil exacto dentro de un rango de ± 0.127 mm.



Fig.II.6.- Operación del Dipstick (Fuente: Asociación Española de la carretera).

Equipos de tipo respuesta

El equipo para tipo de respuesta no mide el perfil real de la carretera, sino más bien la respuesta del vehículo a la irregularidad de la superficie. Estos equipos son adecuados para la evaluación de rutina de una red de caminos y proporcionan una representación adecuada de su condición. Los resultados pueden proporcionar a los administradores una indicación general de la condición de la red para efectos de las necesidades de conservación.

Dentro de los equipos más importantes de respuesta podemos encontrar el Mays Ride Meter y el Rugosímetro de Bureau of Publics Roads.

Estos equipos miden los movimientos verticales relativos del eje trasero de un automóvil o de un eje de un remolque con respecto a su marco. Los medidores son instalados en vehículos con un transductor de desplazamientos en el cuerpo del vehículo, localizado entre la mitad del eje y el cuerpo de un automóvil o remolque.

El transductor detecta incrementos pequeños del movimiento relativo del eje con respecto al cuerpo del vehículo o remolque. Los resultados consisten de una gráfica del movimiento relativo actual del eje cuerpo en contra del tiempo de viaje.



La desventaja de éste tipo de equipos es que la medida del movimiento del eje contra el tiempo depende de la dinámica particular del vehículo de medición, la cual resulta en dos efectos no deseados mostrada a continuación.

- *Los métodos de medición de la rugosidad no han sido estables con el tiempo.* Las medidas hechas el día de hoy con éste tipo de equipos no pueden ser comparadas con certidumbre con los realizados años antes.

- *Las mediciones de la rugosidad no han sido transportables.* Las mediciones de estos equipos hechas por un sistema son raramente reproducidas por otro.

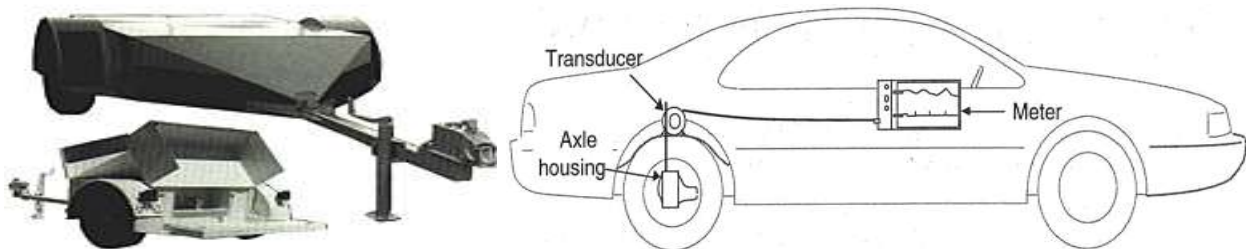


Fig.II.7.- Mays Ride Meter y vehículo con dispositivo tipo respuesta (Fuente: camineros.com).

Perfilógrafos de rueda sensible

Los perfilógrafos, en general, son dispositivos que miden el perfil real de la carretera y proporcionan reproducciones exactas y completas del mismo. Los perfilógrafos han estado disponibles desde hace bastantes años y existe una variedad de diferentes formas, configuraciones y marcas. Las mayores diferencias de entre los perfilógrafos involucran la configuración de sus ruedas y la operación de los procedimientos de medición de cada equipo.



Antaño, los perfilógrafos eran grandes dispositivos con muchas ruedas el cual era empujado manualmente a través de la superficie de rodamiento, su uso era muy incómodo y lento, ya que se necesitaba de muchos hombres para poder maniobrar éste dispositivo.

Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada para proporcionar un movimiento vertical libre al centro de un marco. La desviación en comparación con plano de referencia establecido desde el marco del perfilógrafo, es registrada (automáticamente en algunos modelos) en una gráfica de papel proveniente del movimiento de la rueda de sensibilidad.

En éste caso vamos a describir al Perfilógrafo California porque es el de mayor uso en esta categoría, pero cabe mencionar que existen equipos de esta categoría como el Viógrafo que es un modelo evolucionado de la regla de 3 metros.

El Perfilógrafo de California es la versión actualizada de los perfilografos antiguos con muchas mejoras a los anteriores, está constituido por una estructura de aluminio de 10.70 m de longitud y teniendo un ancho en la parte delantera y trasera de 1.0 m, es el único modelo que cuenta con 2 baterías externas desmontables las cuales rinden cada una 4 horas aproximadamente para la alimentación continua de energía al equipo; esta sostenido por 4 ruedas de montaje, 2 de dirección delanteras y 6 ruedas de montaje traseras, así mismo, integra una rueda de bicicleta la cual opera el odómetro indicando la distancia recorrida.

También cuenta con una rueda en la parte central del Perfilógrafo que detecta las protuberancias o asentamientos de la superficie de rodamiento, enviando dichas irregularidades al equipo graficador que se encuentra conectado a una computadora de mano, la cual se encarga de almacenar los datos recolectados para que al término de cada prueba se proceda a realizar la impresión, dicha computadora e impresora térmica están integradas en un estuche de alto impacto y conectadas a la computadora de mano, para que finalmente se obtenga el diagrama denominado “**Perfilograma**” donde se muestran las



irregularidades superficiales de cada franja analizada. Éste instrumento permite medir el Índice del Perfil.



Fig. II.8.- Perfilógrafo tipo California (Fuente: Fotografía propia tomada en la carretera Campeche-Mérida).

Perfilógrafos tipo inerciales o de alto rendimiento

Estos equipos son usados para proporcionar exactas, escalas y completas reproducciones del perfil del pavimento dentro de un cierto rango. Están disponibles en diversas formas y pueden ser usados para calibrar los equipos de “tipo de respuesta”. Los equipos pueden ser bastante costosos y complejos.

Con el perfilógrafo inercial se puede recolectar información del estado de la carretera, midiendo con exactitud el perfil longitudinal y transversal de la misma. Éste equipo calcula, almacena y despliega automáticamente parámetros como el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y también el parámetro de Ahuellamiento o Roderas del pavimento, además de registrar la velocidad de operación del equipo; todo esto lo realiza en tiempo real y a la velocidad de circulación de la carretera.



Los perfilógrafos inerciales que cuenta con los siguientes componentes básicos:

- a) Un dispositivo laser para medir la distancia entre el vehículo y la superficie de la carretera.
- b) Un acelerómetro inercial de referencia para compensar el movimiento vertical del conjunto del vehículo.
- c) Un odómetro de distancias para ubicar los puntos donde se va a medir el perfil a lo largo del pavimento.

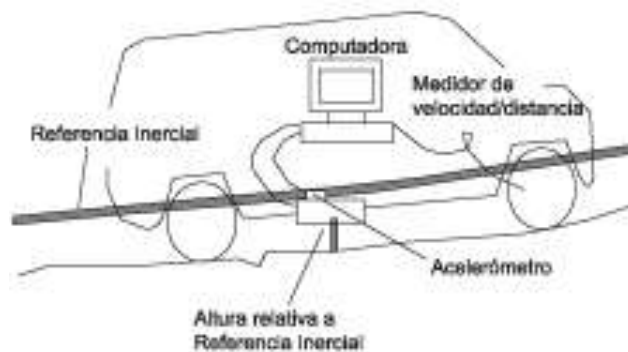


Fig. II.9.- Modelo simplificado de los perfilógrafos inerciales (Publicación técnica N° 324 Camineros.com).

El dispositivo laser que mide la distancia vertical del vehículo a la carretera funciona por medio de un punto de luz invisible que es proyectado sobre la superficie de la carretera, éste punto es reflejado a través de un lente a un sensor de desplazamiento sensible a la luz.

El acelerómetro es utilizado en un perfilógrafo para establecer una referencia inercial de la cual puedan hacerse las medidas de altura. La aceleración vertical medida por el acelerómetro es integrada dos veces para establecer su posición vertical. Los acelerómetros son usualmente colocados sobre los sensores que están alineados con las llantas del vehículo de medición deben ser orientados verticalmente



El odómetro en el perfilógrafo debe ser capaz de medir exactamente la distancia longitudinal de la medición. Al hacer mediciones en construcciones nuevas, la ubicación de los lugares para acciones correctivas es determinada a partir de los datos del perfil.

Por lo tanto, la medida exacta de la distancia longitudinal relativa a marcas fijas es muy importante.



Fig., II.10.- Dispositivo laser, acelerómetro y odómetro respectivamente (Fuente: pagina web de Dynatest.com).

Dentro de las principales modelos de perfilógrafos tipo inercial o de alto rendimiento, podemos encontrar los de Dynatest y los de Dakota del Sur. Es importante saber que los de Dakota del Sur es el que usa en la mayor parte de la Unión Americana. Cuesta menos que el Dynatest, pero es menos exacto.



Fig. II.8.- Perfilógrafo Inercial marca Dynatest (Fuente: Dynatest.com).



II.3.- EL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL EN LA RED NACIONAL DE CARRETERAS

ANTECEDENTES

La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar un "índice único". Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un sólo equipo a todos y tampoco se podía impedir las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos.

El Banco Mundial, que es una fuente de asistencia financiera y técnica para los llamados países en desarrollo, patrocinó varios programas de investigación en los años setentas, para conocer los principales problemas en las naciones en vías de desarrollo.

Algunos de estos programas de investigación comprobaron que los caminos con poca inversión en infraestructura resultan costosos, a estos países, debido a los costos de operación. La rugosidad de las carreteras fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad del camino, en función de los costos de los usuarios. Se comprobó que los datos de la rugosidad de las diferentes partes del mundo no podían ser comparados, debido a que los datos, aún de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

En 1982, el Banco Mundial inició un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido éste punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un



índice de referencia al que posteriormente se denominó Índice de Regularidad Internacional (IRI).

DESARROLLO DEL CONCEPTO

Fue que a partir de 1986, el Banco Mundial, establece como parámetro universal el IRI (en inglés: *International Roughness Index*), como medición de la regularidad de la superficie. Aunque la transcripción exacta del término *roughness* es "rugosidad", se ha adoptado "regularidad" como un calificativo más adecuado a la hora de definir el IRI.

Éste parámetro se define como la suma de las irregularidades verticales (en valor absoluto) a lo largo de la zona de rodamiento de un tramo, entre la longitud del mismo y sus unidades son m/km.

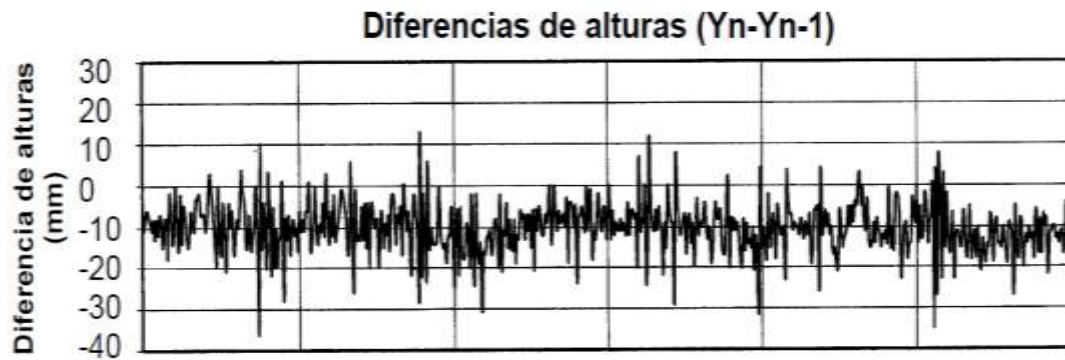


Fig. II.9.- Diferencias de altura para explicar el IRI (Fuente: Publicación Técnica N°108,IMT 1998).

Es muy importante señalar que el perfil no es lo mismo que el IRI, ya que el perfil se mide por medio de dispositivos y el IRI se calcula a partir del Perfil de un camino.

El cálculo del Índice Internacional de Rugosidad se basa en un modelo Matemático llamado Cuarto de Carro normalizado (Quarter-Car), llamado así por corresponder a la



cuarta parte de un auto dibujado en planta y que le corresponde una llanta, una parte proporcional de masas de carrocería, suspensión, amortiguador, etc.

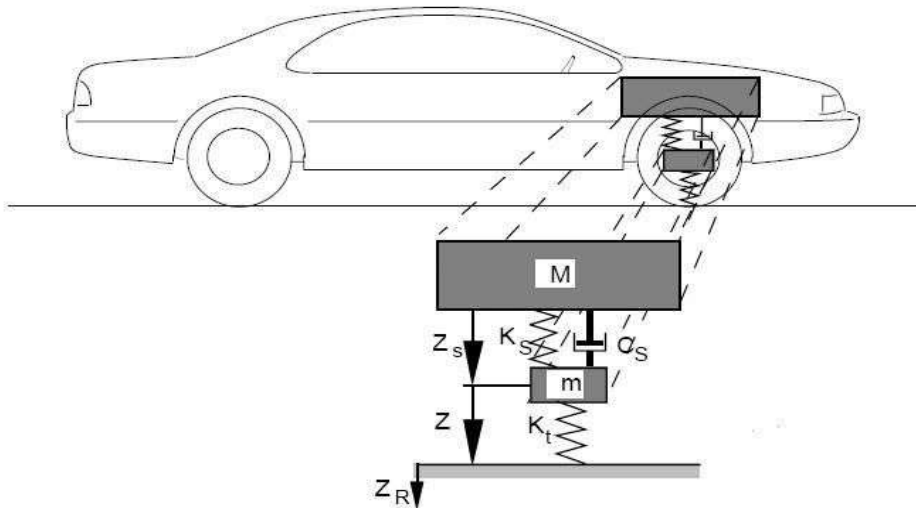


Fig. II.10.- Modelo Cuarto de Carro (Fuente: SCT).

De la figura anterior, se puede observar la cota del perfil longitudinal igual a “ z_R ”, éste corresponde al dato de entrada del modelo matemático.

Para éste modelo existen ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de esta estructura, cuya solución se programó en lenguaje Basic y se le asignó el nombre de “ $\frac{1}{4}$ de coche” al programa como al modelo matemático que simula al vehículo.

Por medio de éste programa se obtienen las diferencias relativas entre las masas (z_s y z) para luego obtener el IRI al dividir estas sumas de diferencias relativas por una longitud determinada.



Por lo tanto, el cálculo del IRI se establece con la siguiente expresión:

$$IRI = \frac{\sum |Z_s - Z|}{L}$$

El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero al circular por una determinada longitud del perfil de carretera, a una velocidad estándar de 80 Km/h. El desplazamiento vertical de la masa superior respecto a la inferior acumulado y divididos entre la distancia recorrida.

EL modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta.

ESCALA Y CARACTERÍSTICAS DEL IRI

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

- Las unidades están en mm/m, m/km o 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), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable.
- 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.

En la siguiente figura se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países.

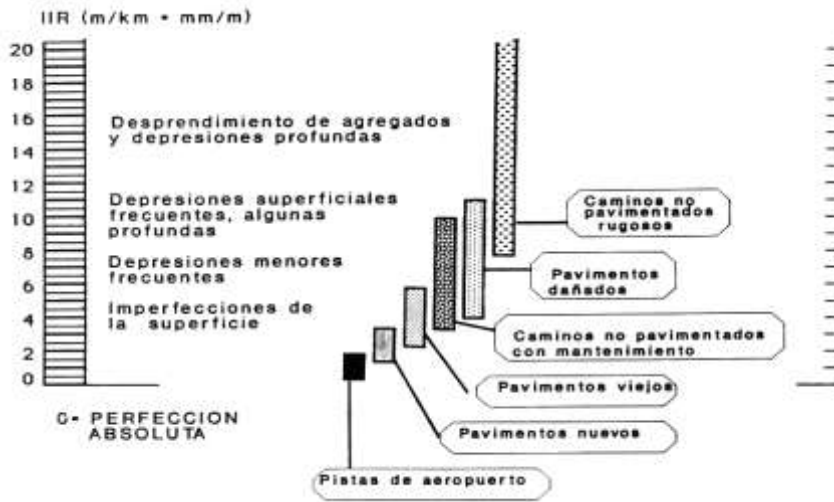


Fig. II.11.- Valores de IRI dependiendo las características del pavimento (Publicación Técnica 108, IMT, 1998).

VALORES COMUNES DE IRI EN ALGUNOS PAISES

En los Estados Unidos, la Federal Highway Administration ha reportado que los rangos 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 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.



U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

Fig. II.12.- Logo del Departamento de Transporte de EU (Fuente: FHA).

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 comenzar además el IRI de 1.5 en la mitad de 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 2,000 vehículos fijan un porcentaje de la longitud de calzada con un valor mínima de 3.5 m/Km y para valores de $IMD < 2,000$ vehículos el IRI mínima de 4.5 m/Km. En la siguiente figura se muestra la red carretera de España.



Fig. II.13.- Red de carreteras de España 2010 (Fuente: ministerio de fomento de España).

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico que se presenta a continuación:

Condición del camino	Pavimento asfáltico IRI (m/km)	Pavimento hidráulico IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 – 3.5
Regular	4.0 – 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	>4.3

Se observa que el criterio es más exigente se presenta en los pavimento de concreto hidráulico que el de pavimento asfáltico.

En Chile se considera un valor del IRI entre 0 y3 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 6m/Km, indica que el camino es malo.

En México es conveniente evaluar el Índice de Regularidad Internacional en ciertos tramos para conocer el estado actual de la red y estimar el rango 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 de un estudio más detallado para conocer las causas de su deterioro, para programar su reparación y cuales 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.

II.4.- EL ÍNDICE DE PERFIL COMO MEDIDA DE REGULARIDAD SUPERFICIAL

El nivel de regularidad de la superficie de rodadura se estima mediante el índice de regularidad Internacional (IRI), que oficialmente se mide con un equipo Mays Meter o con un perfilógrafo inercial de láser, a 80 km/h. Sin embargo, cuando se trata de trabajos de conservación, en los que el tramo de tendido y compactación de la carpeta asfáltica en un día de trabajo no alcanzan la longitud necesaria para desarrollar la velocidad referida, es imposible utilizar el Mays Meter o el perfilógrafo inercial, por lo que la Secretaria de Comunicaciones y Transportes para fines de aceptación o rechazo de un tramo de carretera considera la regularidad en términos del Índice de Perfil (IP).

El índice de perfil es un parámetro de regularidad superficial que se obtiene a partir de un equipo denominado Perfilógrafo tipo California, es importante mencionar que en la actual



normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, **M-MMP-4-07-002**, se establece la metodología a seguir para la medición de la regularidad superficial con éste equipo.



Fig. II.14.- Perfilógrafo tipo california, midiendo el Perfil (Fotografía Propia en la carretera Cd del Carmen-Campeche).

Ésta prueba del índice de perfil permite obtener el Perfilograma o el perfil longitudinal de la superficie de rodadura y determinar a partir de él, el índice de perfil del pavimento; la prueba consiste en medir las irregularidades en la superficie de rodadura que se obtienen al desplazar el perfilógrafo california, a lo largo de un pavimento por estudiar.

De acuerdo a la norma mencionada anteriormente, la obtención del Índice de Perfil en cada línea de tendido, se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a 90 ± 20 cm de la orilla interior de la línea de tendido, por evaluar, las mediciones se dividirán en secciones consecutivas de 200 m o fracción menor.

Es importante destacar que dicha metodología exige establecer ciertas variables de entrada en el programa que se utiliza para la determinación del índice de perfil.

Las unidades del Índice del perfil, generalmente, se da en cm/km, de igual forma, la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha estipulado a través de la



norma N-CTR-CAR-1-04-006/08, inciso H.2, la obtención del índice de perfil, en subtramos de 200 m o menor.

Dentro de esta normativa, se establece que el valor máximo del Índice de Perfil es de 14 cm/Km en pavimentos recién construidos. Así mismo, en la norma N-CSV-CAR.3.02.005/06, inciso H.2. se establece el valor máximo de 31 cm/km para aceptación de un tramo de Conservación de carreteras. En ambos casos, la determinación se hará a lo largo de la línea imaginaria ubicada a 90 ± 20 cm de la orilla interior de la línea de tendido por evaluar.



Fig II-15.- Logo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Fuente: SCT).

El Índice de perfil se calcula con el perfil obtenido del perfilógrafo de California y consiste, básicamente, en definir un ancho de banda para el perfil de un par de centímetros señalado con líneas rojas en la siguiente figura.



Fig.II.14.- Perfilograma (Fuente : Normativa N-CSV-CAR.3.02.005/06, SCT).

Los puntos que existen por arriba o por debajo de éste ancho de banda, son los llamados “Scallops” o cotas fuera de rango. De estas cotas fuera de rango se obtienen los máximos



para un tramo determinado y se suman, esta suma se divide por la longitud del tramo a considerar. Por lo tanto:

Se puede observar ciertas semejanzas entre el IP y el IRI, en cuanto a que ambos consideran una suma acumulada, ya sea de valores máximos (IP) o de desplazamientos relativos (IRI), además que ambos dividen por la longitud del tramo a considerar.

Sin embargo, mientras el IRI considera el modelo del “1/4 de coche” para su cálculo, el IP sólo considera los datos del perfil y no incluye el efecto en el vehículo de las irregularidades del perfil como el modelo del “1/4 de coche” lo hace.

Por otro lado, existe incertidumbre por saber si en verdad se está evaluando bien el Índice de Perfil o si existen anomalías a la hora de ejecutar trabajos de medición de éste. A continuación se muestran los parámetros que se deben de ingresar al programa del perfilógrafo California para determinar el Índice de perfil.

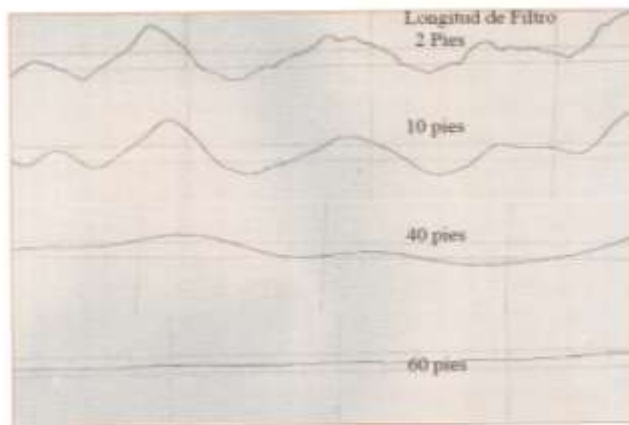
Parámetros del Perfilógrafo California:

- ❖ Tipo de filtro: Butterworth de 3er orden.
- ❖ Longitud de filtro : 610 mm (2 ft).
- ❖ Distancia de corte.
- ❖ Franja semitransparente 5 mm.
- ❖ Localizador de protuberancias: encendido.
- ❖ Altura de protuberancia: 10 mm.
- ❖ Ancho de protuberancia: 7.5 m.
- ❖ Redondeo de picos: 0.00.
- ❖ Localizador de depresiones: Apagado .



El desconocimiento de estos parámetros ha sido la causa de controversias en resultados de la evaluación de la regularidad de una carretera por diferentes equipos, de tal manera que la modificación de algún parámetro puede dar como consecuencia resultados completamente diferentes de un equipo a otro tratándose de un mismo equipo.

En la siguiente figura se observa la medición de un tramo de referencia sobre el cual se determinó su regularidad superficial con el perfilógrafo tipo california, la única variable en los parámetros de entrada en el equipo fue la longitud del filtro



FigII.15.- Perfiles obtenidos para un mismo tramo de pavimento en función de la longitud del filtro (Fuente: Revista Técnica número 21 “Asfáltica”, Asociación Mexicana del Asfalto A.C).

La primera curva corresponde al filtro establecido en la norma establecida de SCT antes mencionada, que es de 2 pies (60.96 cm), las curvas inferiores corresponden a longitudes de filtro de 10, 40 y 60 pies respectivamente, es importante destacar la forma de dichas curvas , que a pesar de tratarse del mismo tramo de pavimento, se observan más suavizadas las curvas conforme aumenta el valor de la longitud de filtro, se puede observar como para la gráfica inferior (filtro de 60 pies) la gráfica de perfil se encuentra dentro de la banda de tolerancia.



Lo anterior significa que un tramo con un Índice de Perfil “real “de aproximadamente 70 cm/km puede llegarse a reportar con regularidad superficial con índice de perfil igual a cero, con el sólo hecho de cambiar el valor de entrada, en éste caso la longitud de filtro.

En la siguiente tabla se puede observar la atenuación del Índice de Perfil en función de la longitud del filtro, lo cual significa que un mismo tramo pueden presentar diferentes valores aparentes de Índice de Perfil en función de la manipulación que se haga de un parámetro que se introducen al programa del perfilógrafo tipo california.

Índice de perfil reportado en función de la longitud de filtro	
Longitud de filtro (pies)	Índice de Perfil (cm/ km)
2	69.8
10	53.4
20	41
40	22.4
50	13.4
60	0



II.5.- ESTANDARIZACIÓN Y CORRELACION DE LAS MEDICIONES DE REGULARIDAD SUPERFICIAL

Debido a la gran cantidad de equipos que miden la regularidad superficial, es necesario tener en cuenta que todas las mediciones tienen una cierta relación entre sí y, que debido al análisis estadístico e investigación, se han hecho necesario tener una estandarización y correlación de las mediciones que se hacen.

La calidad de medición de un equipo se determina a partir de un análisis estadístico de sus mediciones sobre tramos carreteros de referencia en donde se conocen previamente sus valores de regularidad.

CORRELACIÓN ENTRE DIFERENTES EQUIPOS QUE MIDEN EL ÍNDICE DE PERFIL (IP)

A continuación se presentan algunas de las experiencias del Instituto Mexicano del Transporte en varios años de verificación de equipos que determinan la regularidad superficial en las carreteras Mexicanas. Entre los equipos evaluados se encuentran el Mays Meter, perfilógrafos tipo california y perfilógrafos inerciales laser.

En las figuras II-15 y II-16 se muestran las gráficas comparativas entre las mediciones entre perfilógrafos tipo california, para diferentes tramos de referencia con un amplio rango de regularidad superficial en términos del Índice de Perfil.

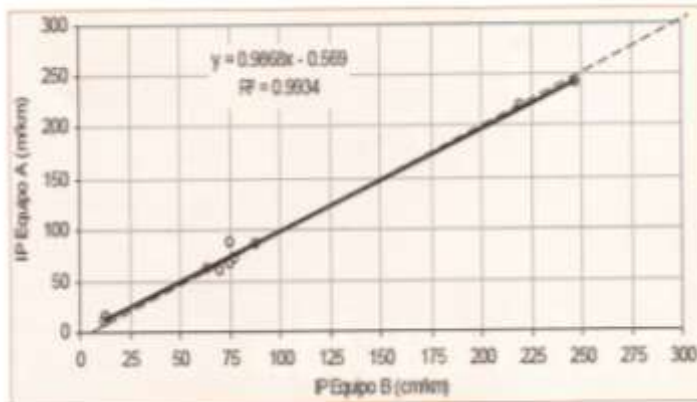


Fig. II.16.- Se muestra la relación que guardan los resultados obtenidos por 2 perfilógrafos tipo California, de la misma marca (Fuente: Revista Técnica número 21 “Asfáltica”, Asociación Mexicana del Asfalto A.C.).

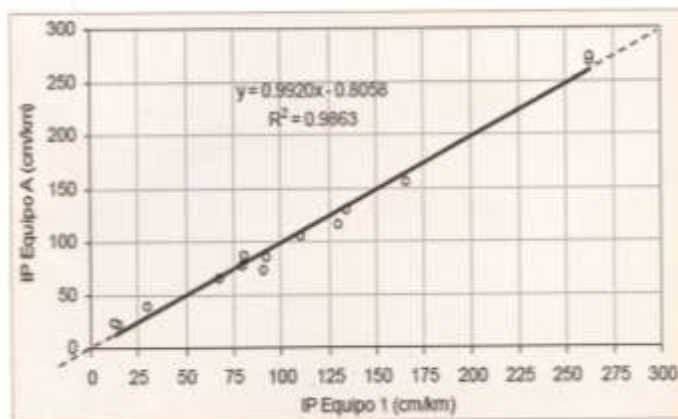


Fig. II.17.- En esta figura se observa la comparativa que existe entre 2 perfilógrafos tipo California de diferente marca (Fuente: Revista Técnica número 21 “Asfáltica”, Asociación Mexicana del Asfalto A.C.).

De lo anterior, es posible afirmar que independientemente de la marca del perfilógrafo tipo California que se utilice, si se cumplen con los requisitos estipulados por la SCT.

Por otro lado, en la figura siguiente se puede observar la respuesta de 3 equipos que determina la regularidad superficial, reportada por el promedio de cada kilómetro evaluado, así como las dispersiones entre los resultados.

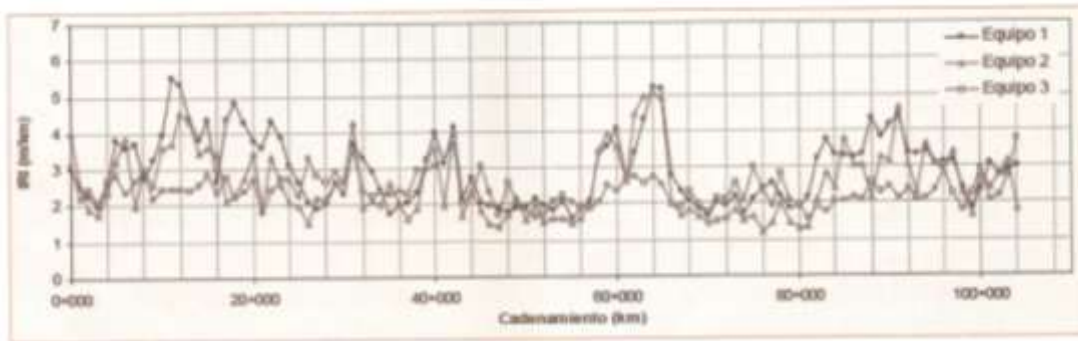


Fig.II.18.- Determinación de la regularidad superficial para un tramo carretero con tres perfilógrafos de alto rendimiento (Fuente: Revista Técnica número 21 “Asfáltica”, Asociación Mexicana del Asfalto A.C).

Asimismo, la siguiente figura presenta la determinación de la regularidad superficial con un perfilógrafo laser y un Mays Meter

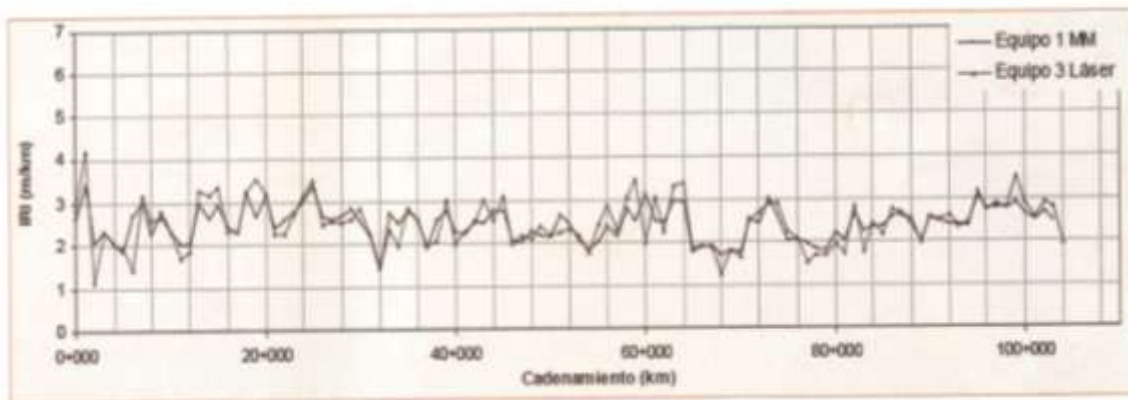


Fig II.19.- Correlación entre equipo Mays Meter y perfilógrafo inercial laser (Fuente: Revista Técnica numero 21 “Asfáltica”, Asociación Mexicana del Asfalto A.C).

Así, de esta última figura, se puede concluir que 2 equipos que se verifican periódicamente, pueden entregar resultados satisfactorios independientes de su física de medición; aquí por ejemplo, el Mays Ride Meter puede utilizarse para la evaluación de redes de caminos, así como para discriminar entre tramos con diferentes calidades de regularidad superficial y definir mejores estrategias en términos de conservación de pavimentos.



CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE INTERNACIONAL DE IRREGULARIDAD (IRI) Y EL ÍNDICE DE PERFIL (IP)

En México 2 de los parámetros que se utilizan con mayor frecuencia para la evaluación de la regularidad superficial en carreteras, lo constituyen el Índice Internacional de Irregularidad (IRI) y el Índice de Perfil; debido a su alto rendimiento con el cual se determina el Índice de Perfil, tradicionalmente se utiliza en la evaluación de caminos nuevos o reconstruidos, para fines de entrega o recepción de dichos trabajos.

El IRI, dada la diversidad de equipos que lo miden, puede ocuparse para la recepción de obras nuevas y como para la evaluación de pavimentos con fines de gestión de las mismas.

Es muy importante contar con una relación que se pueda confiar de un parámetro a otro con la suficiente confiabilidad y, además, que sirva como referencia de los niveles de regularidad de la carretera a la cual se refiera.

A continuación se presenta una gráfica que relaciona los valores de regularidad superficial antes definidos para diferentes perfilografos tipo california (IP) y el método del nivel y el estadal (IRI) con la metodología establecida en la Norma ASTM E 1363.

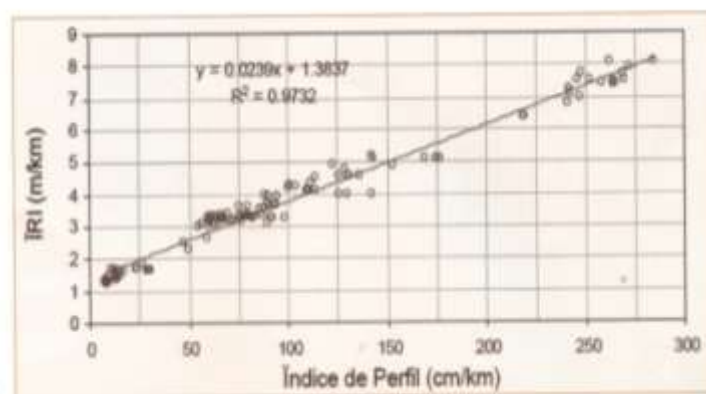


Fig. II.20.- Correlación entre IRI e IP (Fuente: Revista Técnica numero 21 "Asfáltica", Asociación Mexicana del Asfalto A.C).



Es importante destacar la dispersión que se presenta en la correlación presentada en la figura anterior, que es cercana a la unidad, por lo que es confiable su utilización. De la grafica anterior tenemos que:

$$\text{IRI} = 0.0239\text{IP} + 1.3837 \dots\dots\dots (1)$$

Por ejemplo, considerando el valor 31 cm/km estipulado en la norma de conservación, N-CSV-CAR-3-005/06 para que sea aceptada la terminación la capa superior de pavimento y aplicando la expresión 1, tenemos:

$$\text{IRI} = 2.125 \text{ m/km}$$

Para el caso de una construcción de una carretera nueva, la norma N-CTR-CAR-1-04-006/08, señala un valor de 14 cm/km haciendo el mismo análisis, obtenemos:

$$\text{IRI} = 1.718 \text{ m/km}$$

Existen otras correlaciones particulares de IP – IRI desarrollados por investigadores mexicanos dedicados a la ingeniería de pavimentos; sin embargo, la que parece más confiable de las correlaciones llevadas a cabo por investigadores, es la proporcionada por el Dr. Jorge Alarcón Ibarra (Investigador Mexicano del Área de Pavimentos), en virtud que el coeficiente de dispersión es cercano a la unidad, siendo la expresión siguiente:

$$\text{IRI} = 0.0172\text{IP} + 1.3417 \dots\dots\dots (2)$$

Por último, es importante señalar que cada ingeniero dedicado a los pavimentos, debe de tomar en cuenta la correlación que más le convenga y que tenga que ver con las condiciones representativas del camino, además de tener criterio ingenieril para que su elección y que sea la más adecuada.



CAPÍTULO III.

EL IMPACTO ECONÓMICO DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

III.1.- COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR

En la vida diaria de los habitantes de cualquier región, existe la necesidad de trabajar para llevar el sustento a sus familias; para esto, es necesario hacer uso de la infraestructura carretera, ya que es el principal medio para mover mercancías, pasajeros, así como para introducir en las regiones los servicios de salud, educación, vivienda, comercio, etc.

De las características que posea dicha infraestructura, va a depender el comportamiento económico, social, político y cultural, así como también el intercambio tecnológico y comercial de las regiones del país. La realización de las obras de construcción, conservación y modernización requeridas son muy importantes para que las redes de transporte funcionen adecuadamente y formen una infraestructura capaz de promover el crecimiento, integración y desarrollo de las regiones.

De lo antes mencionado, se hace hincapié en señalar que los costos que cualquier país debe de enfrentar durante toda la vida útil de un camino se dividen en tres clases:

- Costos iniciales de construcción, que implican la realización de un proyecto.
- Costos de conservación, que son aquellos que abarcan las inversiones para mantener el camino en buenas condiciones, así como de conservar la calidad de servicio al usuario, enfrentando el probable crecimiento en la demanda.



•Costos de operación, que se producen cotidianamente por la circulación de los vehículos por dicho camino.

El conocimiento de los costos de operación vehicular es fundamental en la planeación, diseño y aspectos operativos de los sistemas de transporte. En el caso de los sistemas de transporte carretero, el costo de operación de un vehículo automotor determinado es aquél en el que se incurre por mantenerlo funcionando por unidad de longitud recorrida. El costo de operación consiste en el costo de recorrido más los costos fijos.

El estado superficial de un camino influye directamente en aspectos tales como:

1. Costos de operación de los vehículos.
2. Calidad de manejo; comodidad.
3. Seguridad de los usuarios al transitar por las carreteras.
4. Las cargas dinámicas que transmiten los vehículos, que a su vez afectan al pavimento.

El criterio que debe orientar las decisiones en el área del transporte es minimizar los costos nacionales totales durante la vida útil del camino. Los costos de operación de los vehículos implican una atención especial debido a que estos superan a los otros dos, ocurren rutinariamente por el paso del tráfico de vehículos a lo largo de la carretera y tienen que ser pagados por los usuarios como resultado de la operación de dichos vehículos.

Los principales costos de operación son los siguientes:

- a) Combustible.
- b) Lubricantes.
- c) Llantas.
- d) Reparación y refacciones.
- e) Operador.
- f) Depreciación y reposición de vehículos.
- g) Intereses.



- h) Seguros.
- i) Tiempo de traslado 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 pavimentada 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 pendiente o grados de curvatura, así como la de otros vehículos, afecta las condiciones de operación y por lo tanto, los costos correspondientes.

En términos de diseño y construcción iniciales, resulta también conveniente gastar más en la construcción de las carreteras para tener estructuras estables y pavimentos resistentes y con ello caminos más durables, con menos interrupciones al tránsito para su conservación y, por tanto, más seguros y acumulativamente más económicos para los usuarios y el País en general, que gastar menos en la inversión inicial, buscando un ahorro fugaz y repercutiendo en altos costos de conservación a la dependencia responsable y de operación a los usuarios y, por ende, al País en su conjunto durante toda la vida útil del camino.

En la figura III.1, se muestra la importancia en costos de operación vehicular comparando acciones de conservación de carreteras y no hacer algo.

Habrán casos, sin duda, en los que la conclusión no será favorable al realizar una mayor inversión inicial en construcción o en conservación. La recuperación o justificación de esta, gracias a la reducción de costos de operación, puede variar en forma importante e incluso no darse en el periodo de vida útil de un camino. Ello dependerá, por supuesto, de las magnitudes del tránsito, de su composición, de su crecimiento anual, de los ritmos del deterioro de los caminos y del tamaño de los montos de inversión implicados.

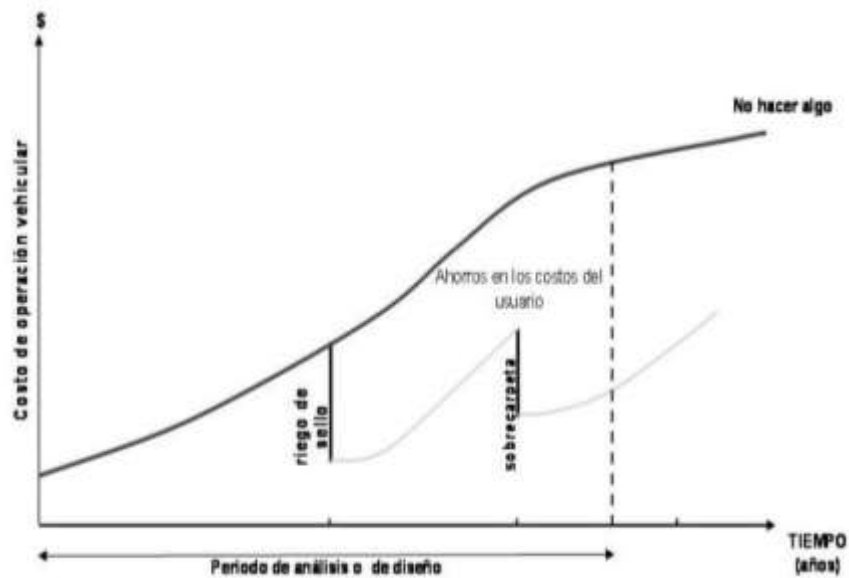


Fig. III.1.- Costos de operación Vehiculas Vs Acciones de conservación (Fuente: Publicación Técnica No. 316 del Instituto Mexicano del Transporte).

III.2.- EL CONCEPTO DEL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

INTRODUCCIÓN

En una visión general, el costo inicial de una carretera es visto, sólo como parte del costo total del proyecto, por lo que se considera el concepto del “costo del ciclo de vida”. El sistema primario de costos para el análisis del ciclo de vida incluye los costos de construcción y de conservación, los costos de operación vehicular, a los cuales se pueden añadir los costos del tiempo de recorrido.

El Análisis de Costos del Ciclo de Vida es una herramienta fundamental para evaluar proyectos de inversión y aplica la tasa de actualización a los costos del ciclo de vida de dos o más alternativas que pueden integrar un proyecto dado. Generalmente el LCCA (por sus siglas en inglés) es usado por analistas que buscan minimizar el costo del ciclo de vida,



es decir, no sólo los costos iniciales, sino también los costos futuros durante la vida útil del proyecto.

APLICACIONES DEL ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA

A continuación se presentan las principales aplicaciones del análisis del costo del ciclo de vida.

- Diseño, selección y documentación de las opciones más redituables para la ejecución de un proyecto o el logro de un objetivo.
- Evaluar estrategias de conservación de pavimentos.
- Planeación e implementación de proyectos, especialmente al considerar diferentes áreas de trabajo.

Debe hacerse notar que en todos los casos anteriores, se trata de evaluar diferentes propuestas con iguales grados de servicio. Si se tratara de alternativas en los que existe una diferencia en el nivel de servicios, la herramienta a usar podría ser un análisis costo-beneficio.

Al aplicar esta herramienta, el analista debe tomar en cuenta un periodo de tiempo suficiente para que la tasa de descuento funcione correctamente. El no abarcar un periodo suficiente en el análisis, así como el incluir costos que difieren significativamente entre las diferentes alternativas, puede producir resultados poco precisos.

Por ejemplo, el periodo de tiempo al evaluar proyectos de conservación de carreteras puede ser de 20 a 40 años.

Algunos de los costos importantes a tomar en cuenta son los asociados con actividades de construcción rehabilitación y mantenimiento, y deben de ser identificados y evaluados con respecto al horizonte de tiempo que se use.



Cuando se evalúan alternativas con objetivos idénticos es común que algunos de sus costos sean iguales en cantidad y en tiempo de aplicación, por lo cual pueden no ser evaluados y se debe concentrar principalmente en aquellos costos que difieren de una propuesta a otra.

Otros costos a tomar en cuenta son los llamados “Costos del Usuario”, que son los costos en los que los usuarios incurren al hacer uso del proyecto carretero. Estos costos sí pueden variar significativamente entre una y otra opción y más al hablar de los requerimientos de las diferentes zonas de trabajo en la construcción o rehabilitación de las opciones. En la tabla III-2 (US Department of Transportation, 2003) se mencionan algunos de los costos más comunes y su clasificación.

COSTOS DE AGENCIA	COSTOS DE USUARIO
Diseño e Ingeniería	Retrasos
Adquisición de terreno	Accidentes
Construcción	Costos de Operación de los vehículos
Reconstrucción/Rehabilitación	
Preservación/rutinas de mantenimiento	

Tabla III.2.- Principales costos de agencia y costos de usuario (Fuente: Elaboración Propia).

Existe una controversia al evaluar los costos de la agencia y los costos del usuario, ya que muchas compañías prefieren relegar estos últimos, pues es difícil estimarlos al hablar, por ejemplo, de retrasos en las áreas de trabajo, y se concentran más en los otros. Sin embargo, esta práctica puede resultar inconveniente para el Análisis del Costo de ciclo vida.

Algunas de las herramientas usadas en el Análisis de costo de ciclo de vida, son hojas de cálculo y técnicas de análisis de riesgo. El Análisis del Ciclo de Vida del proyecto, es uno de los pilares del funcionamiento del HDM-4, que es un modelo de gestión de carreteras, ya que permite visualizar el comportamiento de los flujos de efectivo del pavimento, año con año, hasta el final de su vida útil.



La comparación del estado de la carretera se hace también año con año y gracias a esta comparación es que se pueden identificar los factores que hacen a una alternativa fallar, y variarlos hasta que se obtengan resultados satisfactorios.

El HDM-4 es muy útil en el desarrollo de:

- Análisis de proyecto para evaluaciones económicas detalladas.
- Análisis de programación para la preparación de programas de trabajo a través de uno o varios años.
- Análisis de estrategias para la planificación a largo plazo.
- Investigación y estudios de política.

En la figura III.3 se muestra el Análisis del costo de ciclo de vida en el modelo de gestión de carreteras HDM.4, en el cual toma parámetros de deterioros en las carreteras como es el caso de la regularidad superficial.

III.3.- COSTOS DE OPERACIÓN EN MÉXICO

En México existe una red nacional de carreteras, mencionado ya anteriormente, de más de 366,341.46 kilómetros, cuya vital importancia para el país se refleja en el hecho de que por ella se desplazan más del 95% de las personas-kilómetro y del 70% de las toneladas-kilómetro de carga.

De esta red, la fracción que sostiene la mayor parte de las cifras anteriores es la denominada red carretera federal pavimentada (en adelante referida sólo como Red Carretera Federal). Uno de los objetivos fundamentales de la Red Carretera Federal (RCF) es respaldar la actividad productiva nacional, facilitando el tránsito fluido y expedito de los intercambios comerciales nacionales e internacionales.

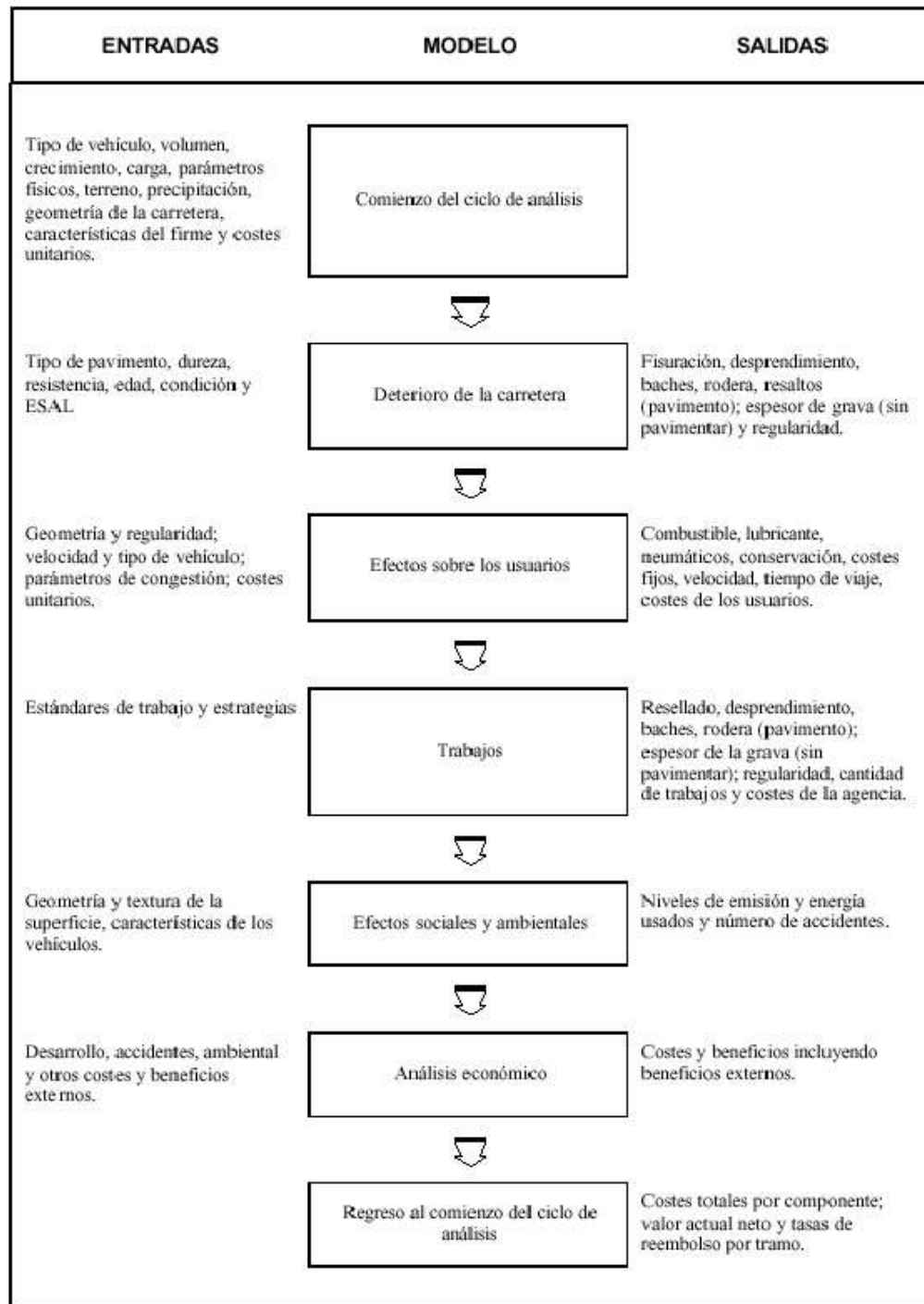


Fig., III.3.- Análisis del costo de ciclo de vida en el modelo de gestión de carreteras HDM.4 (Fuente: camineros.com).



Evidentemente éste objetivo está relacionado con minimizar los costos de operación de los vehículos del autotransporte de carga. Con el fin de generar estrategias dirigidas al logro de esta meta, es indispensable estudiar, determinar y analizar, con la mayor precisión posible, los costos operativos en que incurren los diferentes tipos de vehículos de carga que circulan por la RCF.

A nivel internacional el estudio de normas para el diseño y mantenimiento de carreteras se ha desarrollado en gran medida bajo el auspicio del Banco Mundial (Bennett, 2000). Las relaciones entre costos de operación y las características de la infraestructura carretera, incluyendo la rugosidad, fueron estudiadas en Kenia (1971-1975), Brasil(1975-1984), Santa Lucía (1977-1982) e India (1977-1983) (Bennett, 2000), lo cual sirvió de base para que en 1987 se produjera el programa de cómputo llamado: Vehicle Operating Costs (VOC). Con ayuda de esta herramienta computacional VOC (Vehicle Operating Cost) se pueden obtener los costos de operación vehicular para tramos de autopistas y carreteras multicarril con condiciones distintas de regularidad superficial.

En el pasado, ya se han realizado estudios en México [Aguerreberre y Cepeda 1991 a,b] de determinación de los costos operativos de vehículos mexicanos de carga, pero no referidos específicamente a la Red Carretera Federal. Éste trabajo será una etapa del esfuerzo global anterior en tanto que buscará efectuar la determinación de los costos de operación vehicular del autotransporte de carga para la RCF. Con la finalidad de que la estimación de Costos de Operación Vehicular (COV) sea "la más precisa posible.

En México el análisis de costos de operación que más se emplea toma como referencia la **Publicación Técnica No. 316 del Instituto Mexicano del Transporte llamada: “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008”**, que constituye la cuarta edición actualizada de los Costos de Operación Base de los Vehículos Representativos del Transporte Interurbano Mexicano, cuya idea original dio como resultado en 1991, la Publicación Técnica No. 30.



Éste trabajo, llevado a cabo por el IMT, surgió como una necesidad ante la importancia de contar con herramientas actualizadas para calcular costos de operación vehicular (sus antecedentes se remiten a las Publicaciones Técnicas 20, 30, 202 y 282 del IMT), manifiesta por la permanente recepción de solicitudes al respecto por parte de empresas de consultoría y Gobiernos Estatales, así como de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

En el análisis se presentan datos sobre las características de la carretera (tipo de superficie; índice internacional de regularidad; pendiente; etc), del vehículo (peso; carga útil; potencia; velocidad; área frontal proyectada; número de kilómetros conducidos por año; vida útil promedio de servicio; costos unitarios; etc), así como de los neumáticos (número de llantas por vehículo; costo de la llanta nueva; costo del renovado de la llanta; etc) para siete tipos de vehículos; y se calculan los respectivos costos de operación para condiciones ideales.

En el presente trabajo muestra un conjunto de gráficas acerca del efecto del deterioro de los caminos pavimentados en los costos de operación de los vehículos que, mayoritariamente, representan el tránsito en las carreteras nacionales. Se proporcionan los factores del costo de operación base de los vehículos, que pueden ser valuados en unidades monetarias, conocidos los precios unitarios de los diferentes insumos. Con ello pueden actualizarse los valores reales expresados en las gráficas.

Las gráficas relacionan para los siete tipos de vehículos y tres tipos de terreno, la regularidad y el índice de servicio con el costo de operación, el cual se considera como 1 en un tramo recto de pendiente 0% y pavimento nuevo (Índice Internacional de Rugosidad = 1-2 m/km; Índice de Servicio = 4.5-5), de manera que los costos correspondientes a otras condiciones de rugosidad y de alineamiento horizontal y vertical, se expresan como un factor siempre mayor que 1; de esta forma se ha tratado de eliminar la referencia a un precio variable. Los costos de operación que sirvieron de base para elaborar las gráficas y poder así obtener el factor del costo de operación base, se obtuvieron mediante la aplicación del



programa adaptado para las condiciones de México por el IMT, denominado VOCMEX, el cual se aplicó para cada uno de los siete vehículos utilizados, en donde también se utilizaron datos de las características de la carretera.



Fig. III.4.- Gráfica elaborada para obtener los factores del costo de operación base de un vehículos ligero, relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con la topografía del terreno (Fuente: publicación técnica No 316 del IMT, 2008).

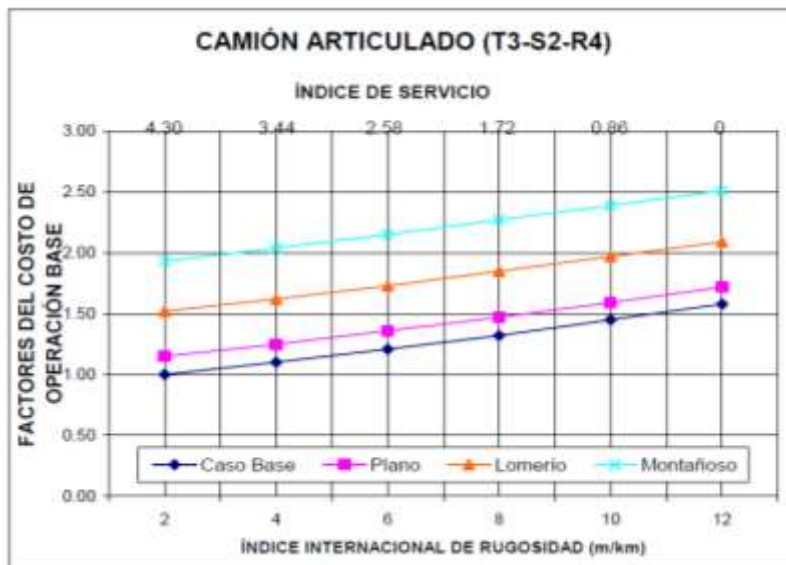


Fig. III.4.- Gráfica elaborada para obtener los factores del costo de operación base de un camión articulado T3-S2-R4, relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con la topografía del terreno (Fuente: publicación técnica No 316 del IMT, 2008).



En las gráficas, las pendientes y curvaturas horizontales que corresponden a cada tipo de terreno son de 1% y 100°/km respectivamente, para el caso plano; de 3% y de 300°/km, para terreno de lomerío; y de 5% y 700°/km, para terreno montañoso. Al caso base le corresponden pendientes y curvaturas nulas.

Para que el uso común de la información contenida en las gráficas no dependa de la variación de los costos unitarios de los consumos y de los vehículos, se decidió, como se ha mencionado, el uso de factores de un costo base.

El costo de operación base se define como el trabajo como el costo de operación por kilómetro de un vehículo que transita sobre una carretera recta y plana; esto es, con curvatura y pendiente iguales a cero, y con pavimento en muy buenas condiciones (Índice Internacional de Rugosidad igual a 2 m/km, Índice de Servicio igual a 4.3). Dicho costo se calcula como la suma de los productos de los diferentes consumos del vehículo en un kilómetro de recorrido, por sus respectivos costos unitarios.

Con el uso de éste concepto, bastará actualizar los costos unitarios periódicamente, utilizando precios promedio nacionales de los vehículos y consumos para actualizar el costo base, multiplicando éste por el factor leído en las gráficas, se obtendrá el costo de operación buscado. Los costos unitarios no deberán incluir impuestos o derechos como el IVA, el RENAVE, el Impuesto Sobre la Adquisición de Automóviles Nuevos (ISAN), etc.

Esto se debe a que desde una perspectiva nacional, interesan los costos y beneficios que la construcción y operación de los caminos representa para el país en su conjunto; en éste sentido, los impuestos son sólo transferencias de dinero que el país no gasta, pues no forman parte del costo de producción de los insumos o de los vehículos. Para los combustibles se toma el precio en bomba sin IVA.



Finalmente los **costos de operación anuales por kilómetro para cada tipo de vehículo** quedan definidos de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{COA} = \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365$$

Donde:

COA.- Costo de operación anual, por kilómetro para todos los vehículos de un mismo tipo.

Fb.- Factor del Costo de Operación Base, que se lee de las gráficas para el tipo de vehículo, tipo de terreno y estado superficial deseados.

CB.- Costo de Operación Base del vehículo, que se obtiene en el apartado correspondiente de la dicha publicación.

TDPA.- Tránsito Diario Promedio Anual del vehículo.

365.- Número de días en el año.

Es importante recalcar también que en términos de diseño y construcción iniciales, resulta conveniente gastar más en la construcción de carreteras para contar con estructuras estables y pavimentos resistentes, y con ello caminos más durables, con menos interrupciones al tránsito para su conservación y, por tanto, más seguros y acumulativamente más económicos para los usuarios y la nación en general, que gastar menos en la inversión inicial, buscando un ahorro fugaz que repercuta en altos costos de conservación a la dependencia responsable y de operación a los usuarios y, por ende, al país en su conjunto durante toda la vida útil de la carpeta.

Habrán casos, sin duda, en los que la conclusión no será favorable al realizar una mayor inversión inicial en construcción o en conservación. La recuperación o justificación de esta, gracias a la reducción de costos de operación, puede variar en forma importante e incluso no darse en el periodo de vida útil de un camino. Ello dependerá, por supuesto, de las magnitudes del tránsito; de su composición, su crecimiento anual, los ritmos de deterioro de los caminos y del tamaño de los montos de inversión implicados.

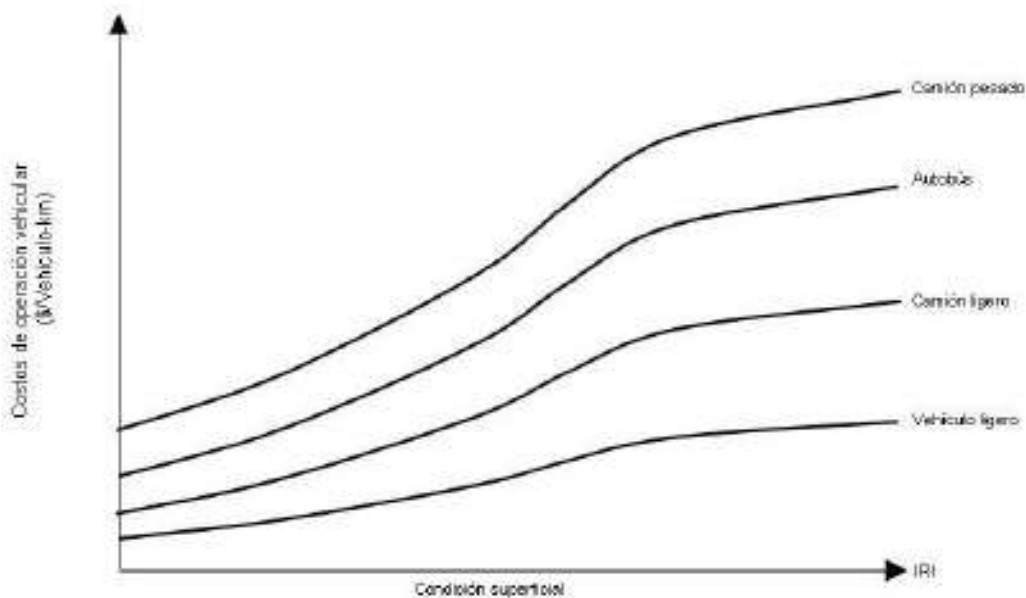


Fig. III 5.- Impacto de la condición de la carretera en los costos de operación (Fuente: Elaboración propia con modelo de The World Road Association, Volumen 1, 2000).

Es sumamente significativo el contenido de la siguiente información.

- En México, los costos del transporte representan el 5% del PIB.
- En un camino con al menos 50 vehículos diarios de circulación, los costos de operación serán mayores que la suma de los costos de construcción inicial y de conservación durante su vida útil¹.
- En una estimación para evaluar el orden de magnitud, en un tramo de 100 km con un TDPA de 3,600 (28% pesados), un pavimento malo costaría al país 56,000 millones de pesos cada año en exceso del costo de operación de un camino en buenas condiciones².

1. BANCO MUNDIAL.

2. DATOS DEL INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.



CAPITULO IV.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PERFIL EN ALGUNOS TRAMOS CARRETEROS

IV.1.- GENERALIDADES

El progreso del país depende del desarrollo de la infraestructura, en éste caso del desarrollo de la infraestructura carretera, ya mencionado anteriormente; la “infraestructura” de la infraestructura, son las carreteras.

Los programas que se desarrollan con recursos del Presupuestos de Egresos de la Federación, a través de la Subsecretaria de Infraestructura de la SCT, son los mostrados a continuación:

- Construcción y modernización de carreteras federales.
- Mantenimiento, Conservación y Reconstrucción de Carreteras Federales.
- Construcción y modernización de caminos rurales y alimentadores.
- Estudios, proyectos, supervisión, derechos de vía y gastos asociados con la ejecución de los programas carreteros señalados.

Todos los programas son importantes, pero para efectos de esta investigación, los programas más importantes son los de construcción y mantenimiento.

Los programas nacionales de construcción y modernización de carreteras tienen como objetivo permitir la comunicación y el intercambio entre regiones, y en México lo



convierte en un instrumento básico para la integración del espacio económico y social del país.

Los programas Nacionales de Conservación de carreteras tienen como principal objetivo mejorar la calidad y elevar la seguridad de las vialidades; abatir el costo económico, social y ambiental del transporte en beneficio de la población y la seguridad del tránsito vehicular.

Para cumplir con los objetivos, dichos anteriormente, es importante mantener en buenas condiciones los parámetros de calidad que se exigen, como es la utilidad fundamental del IP, para la aceptación de la terminación de la carpeta asfáltica, ya sea nueva o conservada. Por eso se han tomado como base 3 tramos de carretera en esta investigación, en el cual se realizó el análisis correspondiente para determinar éste parámetro de regularidad.

De los tramos, 3 tramos analizados en esta investigación, es importante destacar que 2 tramos fueron parte del Programa Nacional de Conservación de carreteras del año 2010 y uno fue parte del Programa Nacional de Construcción y Modernización de Carreteras, éste último dentro del Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012. Todos estos en el estado de Campeche.

En lo que se presenta a continuación, son 3 tramos de carreteras en el cual se analizó el índice de perfil y se comparó, éste parámetro, con respecto a los límites mostrados en la Norma establecida por la SCT y, al compararlo, mostrar cuales tramos pueden cumplir con dicha normativa.

Se hace un análisis estadístico de las irregularidades, en el cual, por cada tramo de carretera estudiado se delimitan en subtramos de 200 m cada uno y se enuncia cuáles de esos subtramos pasaron dicha norma.



IV.2.- EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado para la obtención del índice de perfil, es un perfilógrafo computarizado marca Ames Perfilograph, modelo 4200 tipo California, que cumple con lo indicado en el manual M-MMP.4.07.002/06, índice de perfil.

Éste equipo es utilizado para la obtención del Índice de Perfil, mismo que está constituido por una estructura de aluminio de 10.70 m de longitud y teniendo un ancho en la parte delantera y trasera de 1.0 m, es el único modelo que cuenta con 2 baterías externas desmontables, las cuales rinden cada una 4 horas aproximadamente para la alimentación continua de energía al equipo; esta sostenido por 4 ruedas de montaje y 2 de dirección delanteras y 6 ruedas de montaje traseras, así mismo integra una rueda de bicicleta la cual opera el odómetro indicando la distancia recorrida, también cuenta con una rueda en la parte central del Perfilógrafo que detecta las protuberancias o asentamientos de la superficie de rodamiento, enviando dichas irregularidades al equipo graficador que se encuentra conectado a una computadora de mano, la cual se encarga de almacenar los datos recolectados para que al término de cada prueba se proceda a realizar la impresión, dicha computadora e impresora térmica están integradas en un estuche de alto impacto y conectadas a la computadora de mano, para que finalmente se obtenga el diagrama denominado “Perfilograma” donde se muestran las irregularidades superficiales de cada franja analizada.



Fig. IV-1.- Perfilógrafo California Marca Ames (Fuente: Fotografías propias del autor, tomadas al equipo de medición).



IV.3.- ESPECIFICACIONES Y CALIBRACIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO.

ESPECIFICACIONES

A continuación se presentaran de manera resumida los puntos de mayor relevancia de la normativa de la SCT y que fueron tomadas como procedimiento para elaborar el análisis del IP, esta normativa referente al Libro: MMP MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES, Parte: 4 MATERIALES PARA PAVIMENTOS, Título: 07 SUPERFICIE DE RODADURA, Capítulo: 002 ÍNDICE DE PERFIL, mostrada en sus siglas (M-MMP-4-07-002).

De acuerdo con la norma M-MMP-4-07-002/06 de normatividad de la SCT, la obtención del Índice de Perfil en cada línea de tendido, se hizo a lo largo de la línea imaginaria ubicada a (90 ± 20) cm de la orilla interior de la línea de tendido por evaluar, las mediciones se dividieron en secciones consecutivas de 200 m o fracción. Es importante saber que el objetivo de la prueba es de permitir obtener el perfilograma, en todo el perfil longitudinal de la superficie de rodadura y determinar, a partir de él, el índice de perfil del pavimento. La prueba consiste en medir las irregularidades en la superficie de rodadura que se obtienen al desplazar el perfilógrafo tipo California, a lo largo de una franja de pavimento por estudiar.

Salvo que la Secretaría indique otra cosa, dicho programa de la unidad de proceso se configuro con los siguientes parámetros, mencionados anteriormente:

- Tipo de filtro: Butterworth de 3er orden.
- Longitud de filtro: 610 mm (2 ft).
- Distancia de corte: 200 m.
- Franja semitransparente: 5 mm.
- Localizador de protuberancias: encendido.



- Altura de protuberancia: 10 mm.
- Ancho de protuberancia: 7,5 m.
- Redondeo de picos: 0,00.
- Localizador de depresiones: Apagado.

Para iniciar el levantamiento del Perfilograma de un nuevo subtramo, se colocó la llanta sensora al final del último subtramo levantado. Si se trata del primer subtramo de la obra, el levantamiento empezará a 5 m del inicio de la carpeta. Se desplaza el perfilógrafo por la trayectoria indicada, hasta el final del subtramo, donde la rueda sensora se levanta aproximadamente 3 cm con el fin de dejar una marca fácil de identificar en el Perfilograma, cuando se utiliza el dispositivo de registro gráfico.

La velocidad de operación del perfilógrafo fue menor de 4,5 km/h, es decir, a la velocidad a la que un peatón se desplazaría en condiciones normales, ya que a mayores velocidades el equipo tiende a balancearse y brincar al pasar por algunas irregularidades, lo que da como resultado perfilogramas con muchos sobresaltos difíciles de interpretar.

Cada Perfilograma se identificará rotulando, al menos, la siguiente información: el nombre de la carretera, cadenamientos de inicio y terminación del subtramo, fecha de construcción del subtramo, fecha del levantamiento del Perfilograma, nombre del operador del perfilógrafo y las observaciones pertinentes; tales como la existencia de una curva horizontal o vertical, entre otras. Además, cuando se utilice el dispositivo de registro gráfico, la orientación del Perfilograma se indicará mediante una flecha apuntando hacia arriba.



Fig. IV.2.- Unidades de proceso del perfilógrafo California Marca Ames (Fuente: Fotografías propias, tomadas en el sitio de la realización de los trabajos).

CALIBRACION

Al inicio de cada prueba, el equipo se calibra horizontal y verticalmente para compensar los cambios de la presión del neumático y desgaste del mismo; la calibración horizontal se hará teniendo una sección del camino medida con precisión en una longitud igual a los 100 m; posteriormente, el equipo se colocara al inicio de la sección, tomando como referencia una rueda del perfilógrafo, se empuja éste mismo sobre la distancia que se medirá, a su vez la pantalla mostrara en tiempo real la distancia actual cubierta desde el principio, al llegar al final de la sección deberá marcar correctamente la distancia del camino medida, al ser mayor o menor de la longitud inicial se deberá calibrar las llantas o verificar el desgaste de estas mismas y repetir la prueba.

La calibración vertical se hace mediante dos placas con medidas de $1/8''$ y $1''$, las cuales al iniciar la calibración el equipo; se solicitará que se coloque la primera placa de $1/8''$ y, posteriormente, solicitará que se proceda a colocar la segunda placa de $1''$, y se observará la medida arrojada por el equipo, el bloque medido debe ser exacto dentro de $\pm 0.01''$ o ± 0.254 milímetros, si no se logra la exactitud se repite la prueba.



El perfilógrafo será calibrado en sus escalas horizontal y vertical, inmediatamente antes de utilizarlo por primera vez en la obra, cada vez que se obtengan los perfilogramas equivalentes a 20 km y cuando lo solicite la Secretaría. También se calibrará cuando se reemplace o repare la llanta sensora y cada vez que se reensamble el perfilógrafo. Las calibraciones horizontal y vertical se ejecutarán conforme a los procedimientos que se describen a continuación y los registros que se generen serán conservados como evidencia de las calibraciones, entregando una copia a la Secretaría.



Fig.IV.3.- Imagen que muestra la comprobación de los 25.4 mm o 1” de la calibración vertical del Perfilógrafo (Fuente: Fotografías propias).



IV.4.- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE PERFIL (TRAMO 1)



Características del tramo:

Se realizaron trabajos de Conservación Periódica consistentes en sellado de grietas aisladas, bacheo superficial aislado, fresado de la carpeta existente, renivelaciones aisladas con concreto asfáltico y micro carpeta de concreto asfáltico con espesor de 3 cm.



Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Cd. Del Carmen – Puerto Real, Subtramo: Km 12+000 al Km 25+000.

Análisis en el tramo del km 22+000 al 25+000 (3 kilómetros).

Transito Diario Promedio Anual (TDPA): 4,163 vehículos

Terreno: Sensiblemente plano.

1.- DATOS VIALES., DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS SCT, 2010.



RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL
LADO DERECHO

Obra:	CARRETERA: CD. DEL CARMEN - CAMPECHE, TRAMO: CD. DEL CARMEN - PUERTO REAL, SUBTRAMO: KM 12+000 AL 25+000		
Fecha de Ejecución:	11 de Julio del 2011	Fecha de Calculo:	15 de Julio de 2011
Tramo Km.:	Del Km 22+000 al Km 25+000 Lado Derecho	Equipo Utilizado:	Perfilógrafo Ames Mod. 4200
Tipo de Superficie:	Concreto Asfáltico	Capa:	Carpeta

Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def. cm	Ind. Perfil (Cm/Km)	IP
Del Km	Al Km					

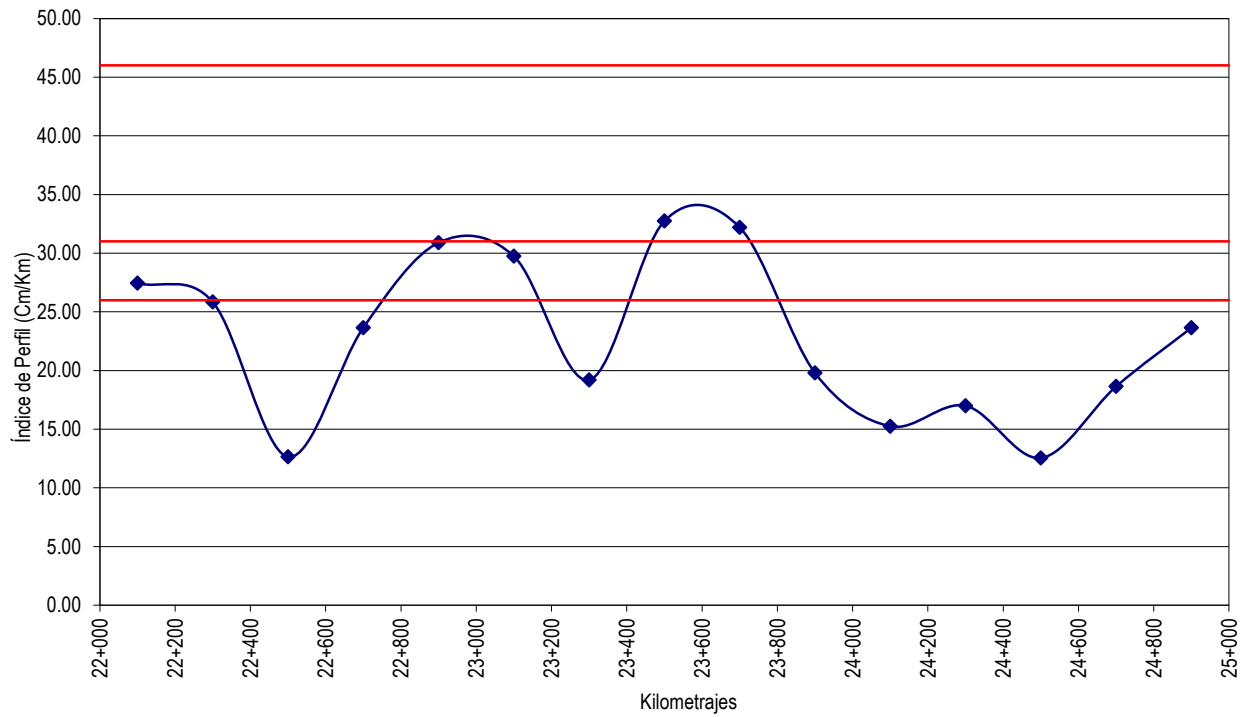
22+000	22+200	Derecho	Único	5.49	27.45	Bueno
22+200	22+400	Derecho	Único	5.17	25.85	Muy Bueno
22+400	22+600	Derecho	Único	2.53	12.65	Muy Bueno
22+600	22+800	Derecho	Único	4.73	23.65	Muy Bueno
22+800	23+000	Derecho	Único	6.18	30.90	Bueno
23+000	23+200	Derecho	Único	5.95	29.75	Bueno
23+200	23+400	Derecho	Único	3.84	19.20	Muy Bueno
23+400	23+600	Derecho	Único	6.55	32.75	Regular
23+600	23+800	Derecho	Único	6.44	32.20	Regular
23+800	24+000	Derecho	Único	3.96	19.80	Muy Bueno
24+000	24+200	Derecho	Único	3.05	15.25	Muy Bueno
24+200	24+400	Derecho	Único	3.40	17.00	Muy Bueno
24+400	24+600	Derecho	Único	2.51	12.55	Muy Bueno
24+600	24+800	Derecho	Único	3.73	18.65	Muy Bueno
24+800	25+000	Derecho	Único	4.73	23.65	Muy Bueno

IP		IP		
Muy Bueno	0.00 - 26.00	Promedio:	4.55	22.75
Bueno	26.00 - 31.00	Máximo:	6.55	32.75
Regular	31.00 - 46.00	Mínimo:	2.51	12.55
Malo	> 46.00			

Observaciones:	Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06
----------------	--



PERFILOGRAMA LADO DERECHO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 - 26.00		
Bueno	26.00 - 31.00	Promedio:	22.75
Regular	31.00 - 46.00	Máximo:	32.75
Malo	> 46.00	Mínimo	12.55



RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL
LADO IZQUIERDO

Obra:	CARRETERA: CD. DEL CARMEN - CAMPECHE, TRAMO: CD. DEL CARMEN - PUERTO REAL, SUBTRAMO: KM 12+000 AL 25+000	
Fecha de Ejecución:	11 de Julio del 2011	Fecha de Cálculo: 15 de Julio del 2011
Tramo Km.:	Del Km 22+000 al Km 25+000 Lado Izquierdo	Equipo Utilizado: Perfilógrafo Ames Mod. 4200
Tipo de Superficie:	Concreto Asfáltico	Capa: Carpeta

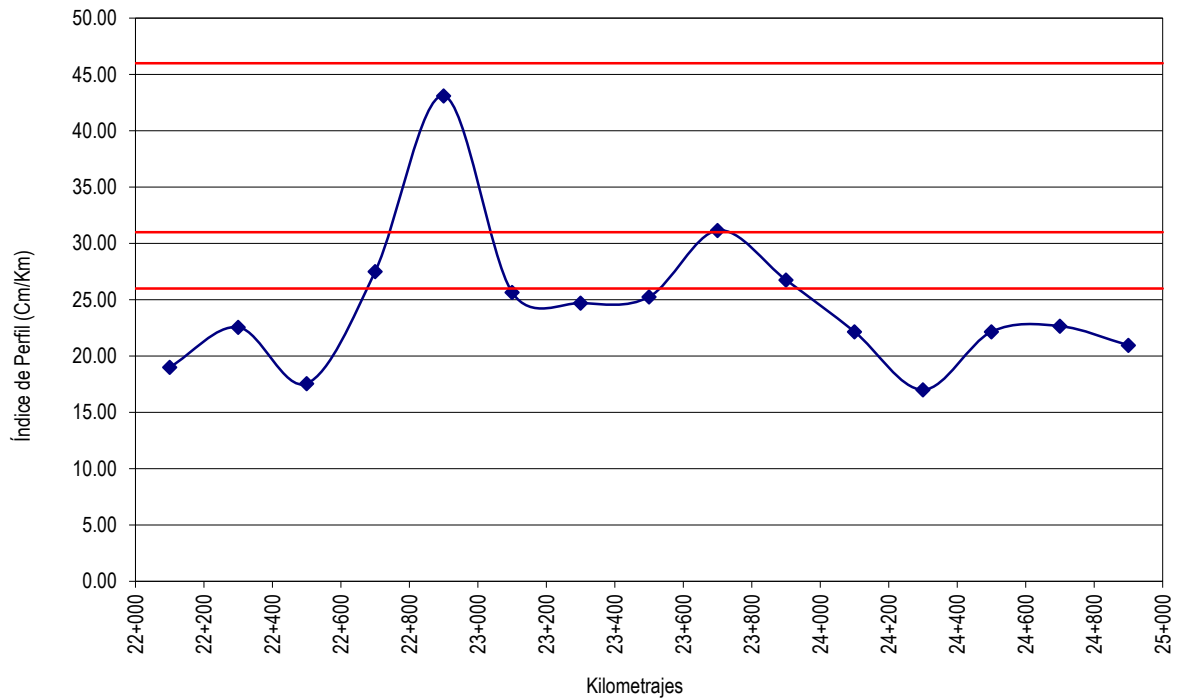
Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def. cm	Ind. Perfil (cm/Km)	IP
Del Km	Al Km					
25+000	24+800	Izquierdo	Único	4.19	20.95	Muy Bueno
24+800	24+600	Izquierdo	Único	4.53	22.65	Muy Bueno
24+600	24+400	Izquierdo	Único	4.43	22.15	Muy Bueno
24+400	24+200	Izquierdo	Único	3.40	17.00	Muy Bueno
24+200	24+000	Izquierdo	Único	4.43	22.15	Muy Bueno
24+000	23+800	Izquierdo	Único	5.35	26.75	Bueno
23+800	23+600	Izquierdo	Único	6.23	31.15	Regular
23+600	23+400	Izquierdo	Único	5.05	25.25	Muy Bueno
23+400	23+200	Izquierdo	Único	4.94	24.70	Muy Bueno
23+200	23+000	Izquierdo	Único	5.13	25.65	Muy Bueno
23+000	22+800	Izquierdo	Único	8.62	43.10	Regular
22+800	22+600	Izquierdo	Único	5.50	27.50	Bueno
22+600	22+400	Izquierdo	Único	3.51	17.55	Muy Bueno
22+400	22+200	Izquierdo	Único	4.51	22.55	Muy Bueno
22+200	22+000	Izquierdo	Único	3.80	19.00	Muy Bueno

IP		IP	
Muy Bueno	0.00 - 26.00	Promedio:	4.91
Bueno	26.00 - 31.00	Máximo:	8.62
Regular	31.00 - 46.00	Mínimo:	3.40
Malo	> 46.00		

Observaciones:
Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06



PERFILOGRAMA LADO IZQUIERDO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 - 26.00		
Bueno	26.00 - 31.00	Promedio:	24.54
Regular	31.00 - 46.00	Máximo:	43.10
Malo	> 46.00	Mínimo:	17.00



ANÁLISIS DE RESULTADOS DE AMBOS LADOS

La relación de los tramos de la Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Cd. Del Carmen – Puerto Real, Subtramo: Km 12+000 al Km 25+000, está indicada en la siguiente tabla:

Del Km	Al Km	Observaciones
22+000	25+000	Lado Derecho
25+000	22+000	Lado Izquierdo

Analizando el tramo del Km 22+000 - 25+000 Lado Derecho, se obtuvieron resultados con valor mínimo de **12.55 cm/km** y valor máximo de **32.75 cm/km** con un promedio de **22.75 cm/km**.

Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	10	66.00
26.00 – 31.00	3	20.00
31.00 – 46.00	2	13.33
> 46.00	0	0.00
Suma	15	100

Analizando el tramo del Km 25+000 - 22+000 Lado Izquierdo se obtuvieron resultados con valor mínimo de **17.00 cm/km** y valor máximo de **43.10 cm/km** con un promedio de **24.54 cm/km**.



Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	12	80.00
26.00 – 31.00	1	6.67
31.00 – 46.00	2	13.33
> 46.00	0	0.00
Suma	15	100

De acuerdo con los valores promedio el Índice de Perfil de los tramos del Km 22+000 – 25+000 Lado Derecho, se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **0.00 a 26.00 cm/km** con un **66.00 %** y de **26.00 a 31.00 cm/km** con un **20.00%**, y del Km 25+000 – 23+000 Lado Izquierdo se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **0.00 a 26.00 cm/km** con un **80.00 %** y de **26.00 a 31.00 cm/km** con un **6.67%**, **por lo que el tramo cumple con lo establecido en la norma.**



ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE PERFIL (TRAMO 2)



Características del tramo:

Se realizaron trabajos de Conservación Periódica consistentes en sellado de grietas aisladas, bacheo superficial aislado, fresado de la carpeta existente, renivelaciones aisladas de concreto asfáltico, micro carpeta de concreto asfáltico con espesor de 3 cm.



Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Isla Aguada – Champotón, Subtramo: Del Km 130+000 al Km 138+000.

Análisis en el tramo del km 135+300 al km 138+000.

Transito Diario Promedio Anual (TDPA): 2,885 vehículos

Terreno: Sensiblemente plano.

1.- DATOS VIALES., DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS SCT, 2010.

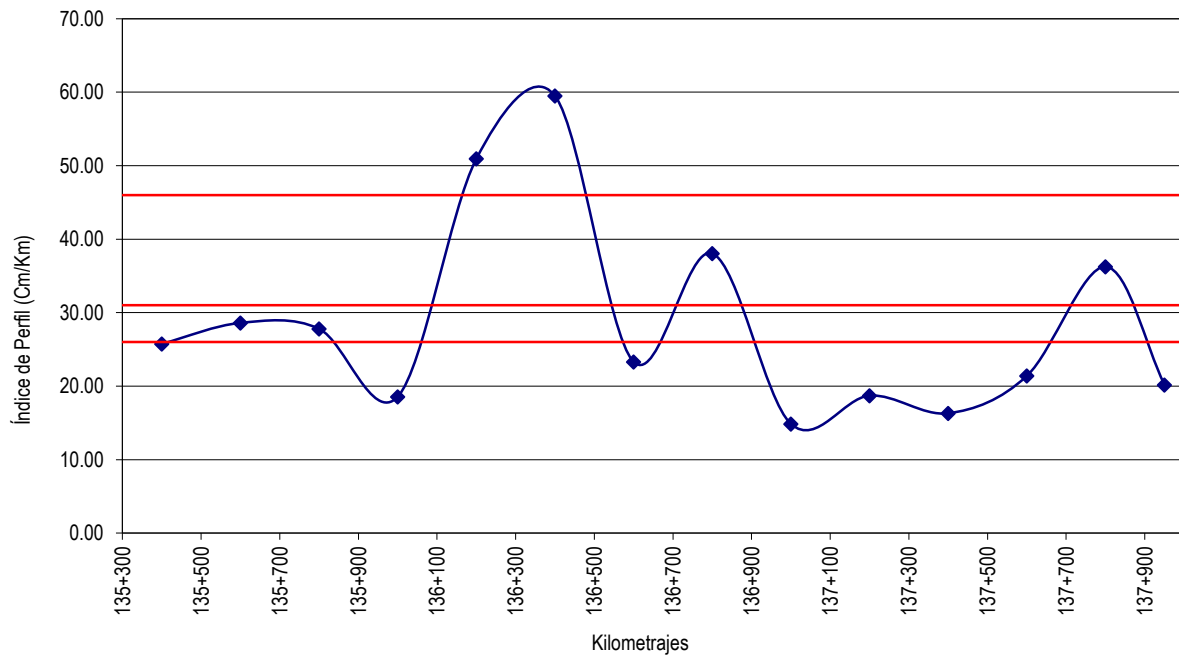


RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL
LADO DERECHO

Obra:		CARRETERA: CD. DEL CARMEN - CAMPECHE, TRAMO: ISLA AGUADA - CHAMPOTON, SUBTRAMO: KM 130+000 AL 138+000						
Fecha de Ejecución: 13 de Julio del 2011				Fecha de Calculo: 15 de julio de 2011				
Tramo Km.: Del Km 135+300 al Km 138+000 Lado Derecho				Equipo Utilizado: Perfilógrafo Ames Mod. 4200				
Tipo de Superficie: Concreto Asfáltico				Capa: Carpeta				
Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def.	Ind. Perfil	Suma de def.	Ind. Perfil	IP
Del Km	Al Km			mm	(mm/Km)	cm	(cm/Km)	
135+300	135+500	Derecho	Único	51.50	257.50	5.15	25.75	Muy Bueno
135+500	135+700	Derecho	Único	57.20	286.00	5.72	28.60	Bueno
135+700	135+900	Derecho	Único	55.60	278.00	5.56	27.80	Bueno
135+900	136+100	Derecho	Único	37.10	185.50	3.71	18.55	Muy Bueno
136+100	136+300	Derecho	Único	101.90	509.50	10.19	50.95	Malo
136+300	136+500	Derecho	Único	119.00	595.00	11.90	59.50	Malo
136+500	136+700	Derecho	Único	46.60	233.00	4.66	23.30	Muy Bueno
136+700	136+900	Derecho	Único	76.10	380.50	7.61	38.05	Regular
136+900	137+100	Derecho	Único	29.70	148.50	2.97	14.85	Muy Bueno
137+100	137+300	Derecho	Único	37.40	187.00	3.74	18.70	Muy Bueno
137+300	137+500	Derecho	Único	32.60	163.00	3.26	16.30	Muy Bueno
137+500	137+700	Derecho	Único	42.80	214.00	4.28	21.40	Muy Bueno
137+700	137+900	Derecho	Único	72.50	362.50	7.25	36.25	Regular
137+900	138+000	Derecho	Único	24.40	201.65	2.44	20.17	Muy Bueno
IP						IP		
Muy Bueno	0.00 - 26.00	Promedio:				5.60	28.58	
Bueno	26.00 - 31.00	Máximo:				11.90	59.50	
Regular	31.00 - 46.00	Mínimo				2.44	14.85	
Malo	> 46.00							
Observaciones: Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06								



PERFILOGRAMA LADO DERECHO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 - 26.00		
Bueno	26.00 - 31.00	Promedio:	28.58
Regular	31.00 - 46.00	Máximo:	59.50
Malo	> 46.00	Mínimo:	14.85



RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL

LADO IZQUIERDO

Obra:	CARRETERA: CD. DEL CARMEN – CAMPECHE, TRAMO: ISLA AGUADA – CHAMPOTON, SUBTRAMO: KM 130+000 AL 138+000				
Fecha de Ejecución:	10 de Marzo del 2011	Fecha de Calculo:			
Tramo Km.:	Del Km 135+300 al Km 138+000 Lado Izquierdo		Equipo Utilizado:	Perfilógrafo Ames Mod. 4200	
Tipo de Superficie:	Concreto Asfáltico		Capa:	Carpeta	

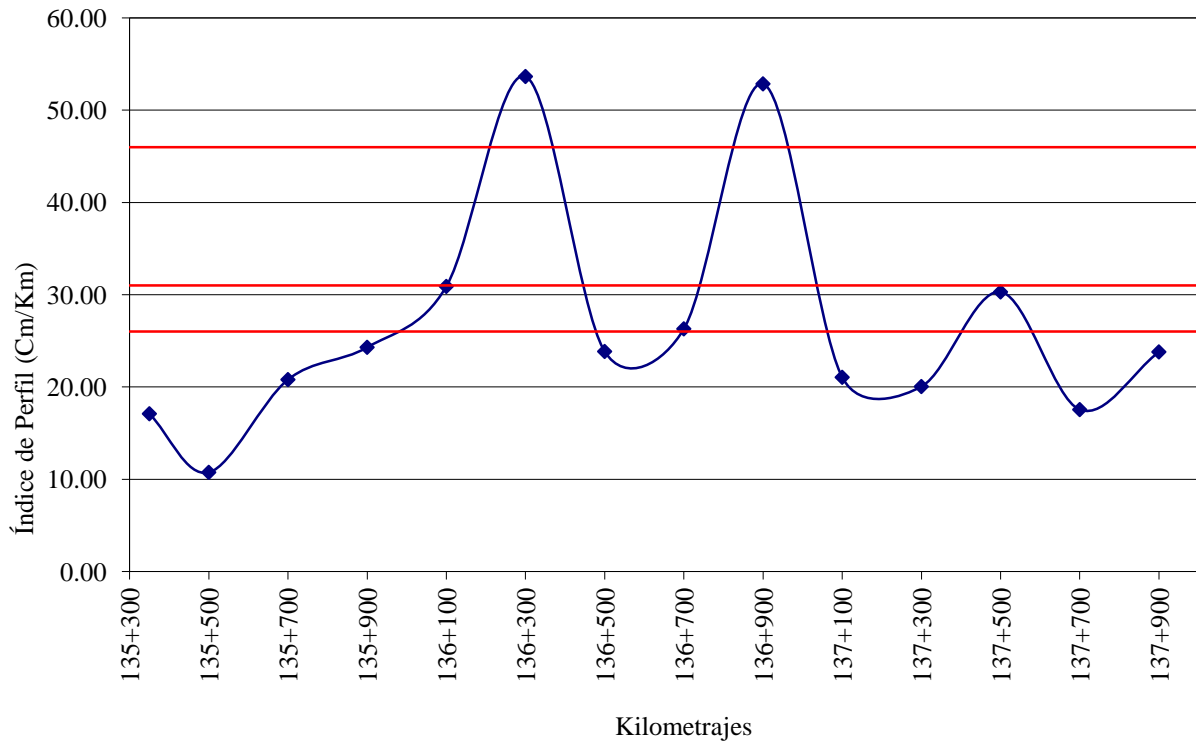
Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def. cm	Ind. Perfil (cm/Km)	IP
Del Km	Al Km					
138+000	137+800	Izquierdo	Único	4.76	23.80	Muy Bueno
137+800	137+600	Izquierdo	Único	3.51	17.55	Muy Bueno
137+600	137+400	Izquierdo	Único	6.06	30.30	Bueno
137+400	137+200	Izquierdo	Único	4.01	20.05	Muy Bueno
137+200	137+000	Izquierdo	Único	4.21	21.05	Muy Bueno
137+000	136+800	Izquierdo	Único	10.57	52.85	Malo
136+800	136+600	Izquierdo	Único	5.26	26.30	Bueno
136+600	136+400	Izquierdo	Único	4.77	23.85	Muy Bueno
136+400	136+200	Izquierdo	Único	10.73	53.65	Malo
136+200	136+000	Izquierdo	Único	6.18	30.90	Bueno
136+000	135+800	Izquierdo	Único	4.86	24.30	Muy Bueno
135+800	135+600	Izquierdo	Único	4.16	20.80	Muy Bueno
135+600	135+400	Izquierdo	Único	2.15	10.75	Muy Bueno
135+400	135+300	Izquierdo	Único	1.71	17.10	Muy Bueno

IP		IP	
Muy Bueno	0.00 – 26.00	Promedio:	5.21
Bueno	26.00 – 31.00	Máximo:	10.73
Regular	31.00 – 46.00	Mínimo:	1.71
Malo	> 46.00		26.66
			53.65
			10.75

Observaciones:	Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06
----------------	---



PERFILOGRAMA LADO IZQUIERDO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 – 26.00		
Bueno	26.00 – 31.00	Promedio:	26.66
Regular	31.00 – 46.00	Máximo:	53.65
Malo	> 46.00	Mínimo	10.75



ANÁLISIS DE RESULTADOS DE AMBOS LADOS

La relación de los tramos de la Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Isla Agua-
da – Champotón, Subtramo: Km 130+000 al Km 138+000, está indicada en la siguiente
tabla:

Del Km	Al Km	Observaciones
135+300	138+000	Lado Derecho
138+000	135+300	Lado Izquierdo

Analizando el tramo del Km 135+000 - 138+300 Lado Derecho, se obtuvieron resultados
con valor mínimo de **14.85 cm/km** y valor máximo de **59.50 cm/km** con un promedio de
28.58 cm/km.

Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	8	57.10
26.00 – 31.00	2	14.30
31.00 – 46.00	2	14.30
> 46.00	2	14.30
Suma	14	100

Analizando el tramo del Km 138+000 - 135+300 Lado Izquierdo se obtuvieron resultados
con valor mínimo de **10.75 cm/km** y valor máximo de **53.65 cm/km** con un promedio de
26.66 cm/km.



Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	9	64.30
26.00 – 31.00	3	21.40
31.00 – 46.00	0	0.00
> 46.00	2	14.30
Suma	14	100

De acuerdo con los valores promedio el Índice de Perfil de los tramos del Km. 135+300 – 138+000 Lado Derecho se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **0.00 a 26.00 cm/km.** con un **57.10 %** y de **26.00 a 31.00 cm/km.** con un **14.30%**, y del Km. 138+000 – 135+300 Lado Izquierdo se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **0.00 a 26.00 cm/km.** con un **64.30 %** y de **26.00 a 31.00 cm/km.** con un **21.40%**, **por lo que cumple con lo establecido en la norma.**



ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE PERFIL (TRAMO 3)



Características del tramo:

Se realizaron trabajos de construcción de dos cuerpos nuevos paralelos entre sí, aprovechando parte del ya existente de 10.50 m de corona en cada uno, del km 10+000 al km 20+000, de la carretera Campeche-Mérida, Tramo: Campeche – límites de estado con Yucatán, Subtramo: Km 10+000 al Km 20+000.



Análisis en el tramo del km 10+000 al km 13+500.

Transito Diario Promedio Anual (TDPA): 7,872 vehículos

Terreno: Sensiblemente plano.

I.- DATOS VIALES., DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS SCT, 2010.

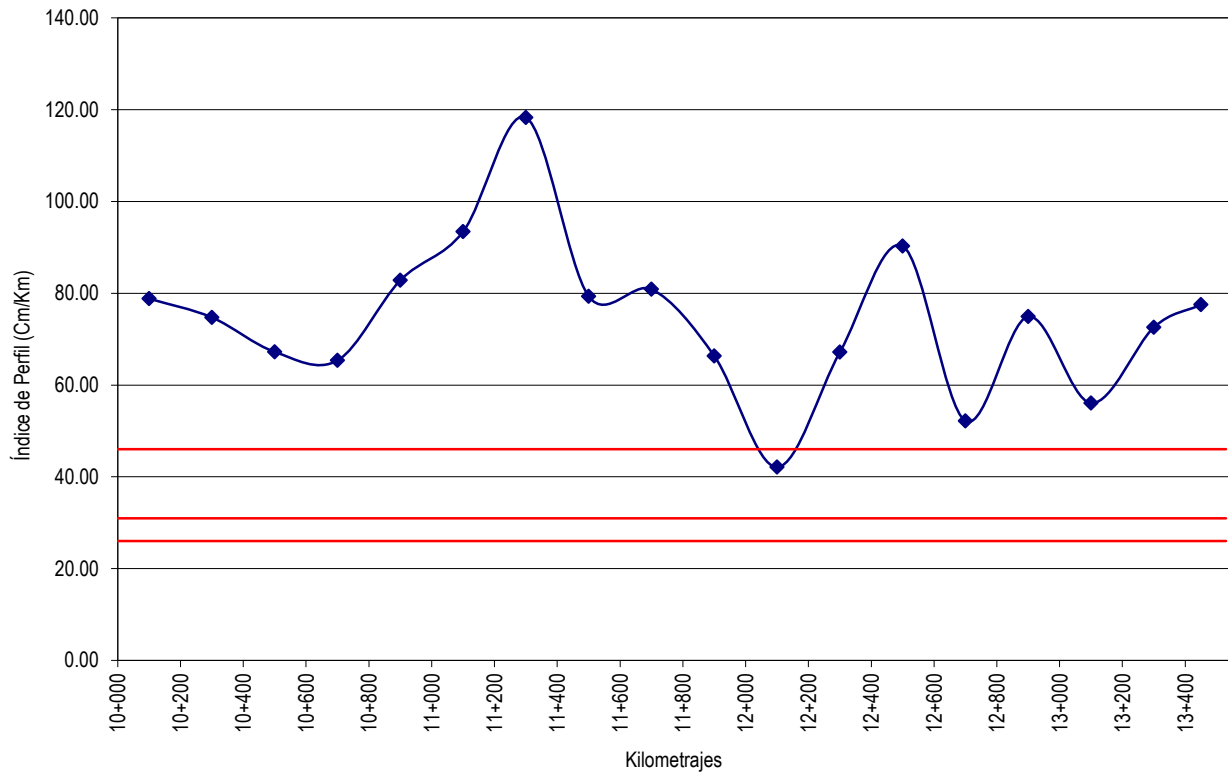


RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL
LADO DERECHO

Obra:		CARRETERA: CAMPECHE - LIM. EDOS. CAMP./YUC. , SUBTRAMO: KM 10+000 AL 13+000					
Fecha de Ejecución:		13 de Julio del 2011		Fecha de Calculo:		18 de Julio de 2011	
Tramo Km.:		Del Km 10+000 al Km 13+500 Lado Derecho			Equipo Utilizado:		Perfilógrafo Ames Mod. 4200
Tipo de Superficie:		Concreto Asfáltico			Capa:		Carpeta
Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def. cm	Ind. Perfil (cm/Km)	IP	
Del Km	Al Km						
10+000	10+200	Derecho	Único	15.77	78.85	Malo	
10+200	10+400	Derecho	Único	14.95	74.75	Malo	
10+400	10+600	Derecho	Único	13.45	67.25	Malo	
10+600	10+800	Derecho	Único	13.12	65.40	Malo	
10+800	11+000	Derecho	Único	16.57	82.85	Malo	
11+000	11+200	Derecho	Único	18.69	93.45	Malo	
11+200	11+400	Derecho	Único	23.66	118.30	Malo	
11+400	11+600	Derecho	Único	15.87	79.35	Malo	
11+600	11+800	Derecho	Único	16.18	80.90	Malo	
11+800	12+000	Derecho	Único	13.27	66.35	Malo	
12+000	12+200	Derecho	Único	8.43	42.15	Regular	
12+200	12+400	Derecho	Único	13.44	67.20	Malo	
12+400	12+600	Derecho	Único	18.06	90.30	Malo	
12+600	12+800	Derecho	Único	10.44	52.20	Malo	
12+800	13+000	Derecho	Único	14.99	74.95	Malo	
13+000	13+200	Derecho	Único	11.22	56.10	Malo	
13+200	13+400	Derecho	Único	14.52	72.60	Malo	
13+400	13+500	Derecho	Único	9.46	77.54	Malo	
IP				IP			
Muy Bueno	0.00 - 26.00	Promedio:	14.56	74.47			
Bueno	26.00 - 31.00	Máximo:	23.66	118.30			
Regular	31.00 - 46.00	Mínimo	8.43	42.15			
Malo	> 46.00						
Observaciones:							
Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06							



PERFILOGRAMA LADO DERECHO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 - 26.00		
Bueno	26.00 - 31.00	Promedio:	74.47
Regular	31.00 - 46.00	Máximo:	118.30
Malo	> 46.00	Mínimo	42.15

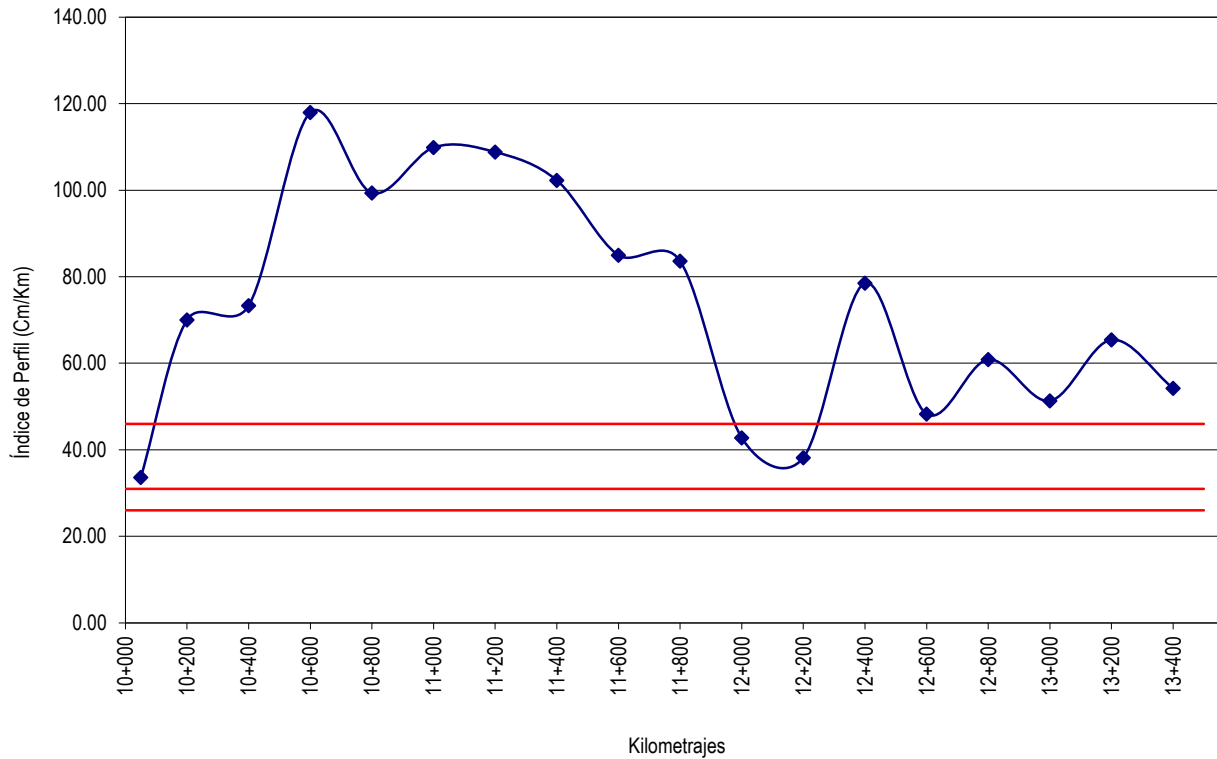


RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DEL ÍNDICE DE PERFIL LADO IZQUIERDO

Obra:		CARRETERA: CAMPECHE - LIM. EDOS. CAMP./YUC., SUBTRAMO: KM 10+000 AL 13+000				
Fecha de Ejecución:		12 de Julio del 2011		Fecha de Calculo:		18 de Julio de 2011
Tramo Km.:		Del Km 13+500 al Km 10+000 Lado Izquierdo		Equipo Utilizado:		Perfilógrafo Ames Mod. 4200
Tipo de Superficie:		Concreto Asfáltico		Capa:		Carpeta
Ubicación:		Carril	Cuerpo	Suma de def. cm	Ind. Perfil (cm/Km)	IP
Del Km	Al Km					
13+500	13+300	Izquierdo	Único	10.84	54.20	Malo
13+300	13+100	Izquierdo	Único	13.08	65.40	Malo
13+100	12+900	Izquierdo	Único	10.26	51.30	Malo
12+900	12+700	Izquierdo	Único	12.17	60.85	Malo
12+700	12+500	Izquierdo	Único	9.65	48.25	Malo
12+500	12+300	Izquierdo	Único	15.70	78.50	Malo
12+300	12+100	Izquierdo	Único	7.63	38.15	Regular
12+100	11+900	Izquierdo	Único	8.55	42.75	Regular
11+900	11+700	Izquierdo	Único	16.72	83.60	Malo
11+700	11+500	Izquierdo	Único	16.99	84.95	Malo
11+500	11+300	Izquierdo	Único	20.45	102.25	Malo
11+300	11+100	Izquierdo	Único	21.76	108.80	Malo
11+100	10+900	Izquierdo	Único	21.97	109.85	Malo
10+900	10+700	Izquierdo	Único	19.87	99.35	Malo
10+700	10+500	Izquierdo	Único	23.59	117.95	Malo
10+500	10+300	Izquierdo	Único	14.66	73.30	Malo
10+300	10+100	Izquierdo	Único	14.00	70.00	Malo
10+100	10+000	Izquierdo	Único	3.36	33.60	Regular
IP				IP		
Muy Bueno	0.00 - 26.00			Promedio:	14.51	73.50
Bueno	26.00 - 31.00			Máximo:	23.59	117.95
Regular	31.00 - 46.00			Mínimo	3.36	33.60
Malo	> 46.00					
Observaciones:						
Parámetros obtenidos de la Norma: N-CSV-CAR-3-02-005/06						



PERFILOGRAMA LADO IZQUIERDO



IP	cm/km	Análisis Estadístico	
Muy Bueno	0.00 - 26.00		
Bueno	26.00 - 31.00	Promedio:	73.50
Regular	31.00 - 46.00	Máximo:	117.95
Malo	> 46.00	Mínimo:	33.60



ANÁLISIS DE RESULTADOS AMBOS LADOS

La relación de los tramos de la Carretera: Campeche - Mérida, Subtramo: Km 10+000 al Km. 13+000, está indicada en la siguiente tabla:

Del Km	Al Km	Observaciones
10+000	13+500	Lado Derecho
13+500	10+000	Lado Izquierdo

Analizando el tramo del Km 10+000 - 13+500 Lado Derecho, se obtuvieron resultados con valor mínimo de **42.15 cm/km** y valor máximo de **118.30 cm/km** con un promedio de **74.47 cm/km**.

Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	0	0.00
26.00 – 31.00	0	0.00
31.00 – 46.00	1	5.50
> 46.00	17	94.50
Suma	18	100

Analizando el tramo del Km 13+500 - 10+000 Lado Izquierdo, se obtuvieron resultados con valor mínimo de **33.60 cm/km** y valor máximo de **117.95 cm/km** con un promedio de **73.5 cm/km**.



Expresando los resultados en porcentaje se tiene lo siguiente:

Parámetros de Evaluación	Nº. de tramos	%
0.00 – 26.00	0	0.00
26.00 – 31.00	0	0.00
31.00 – 46.00	2	11.00
> 46.00	16	89.00
Suma	18	100

De acuerdo con los valores promedio el Índice de Perfil de los tramos del Km 13+500 – 10+000 Lado Derecho se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **31.00 a 46.00 cm/km** con un **5.50 %** y de **>46.00 cm/km** con un **94.50%** y del Km 10+000 – 13+500 Lado Izquierdo se ubica dentro de los parámetro de evaluación de **31.00 a 46.00 cm/km** con un **11.00 %** y de **>46.00 cm/km** con un **89.00%**, por lo que se considera **No aceptable**.

IV.5.- COSTOS DE OPERACIÓN EN TRAMOS ANALIZADOS

El presente análisis de costos de operación en los tramos analizados toma como referencia la **Publicación Técnica No. 316 del Instituto Mexicano del Transporte llamada: “Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008”** que constituye la cuarta edición actualizada de los Costos de Operación Base de los Vehículos Representativos del Transporte Interurbano Mexicano, cuya idea original dio como resultado en 1991, la Publicación Técnica No. 30, cabe mencionar que éste tema se estudió más a fondo en el capítulo III.4 de esta tesis.



Se decidió tomar como base esta publicación ya que se puede decir que la aproximación a la realidad de los resultados de dicho trabajo del IMT ha sido buena por haber tomado como referencia la información real que valida los mismos.

Los **costos de operación anuales por kilómetro** en cada tramo se calculan, para cada tipo de vehículo, de acuerdo con la siguiente fórmula, ya mencionada anteriormente:

$$\text{COA} = \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365$$

Donde:

COA.- Costo de operación anual por kilómetro para todos los vehículos de un mismo tipo.

Fb.- Factor del Costo de Operación Base, que se lee de las gráficas para el tipo de vehículo, tipo de terreno y estado superficial deseados.

CB.- Costo de Operación Base del vehículo, que se obtiene en el apartado correspondiente de la dicha publicación.

TDPA.- Tránsito Diario Promedio Anual del vehículo.

365.- Número de días en el año

Se procedió a calcular los costos de operación base para cada uno de los vehículos, multiplicando los consumos en un kilómetro de los insumos (Combustibles, lubricantes, llantas, refacciones, mantenimiento, etc) por sus respectivos precios unitarios (se realizó una investigación de precios en el mercado local durante Julio y Agosto del 2011 y se obtuvieron precios unitarios promedios de algunos insumos y otros se obtuvieron de la publicación técnica No 316 del IMT del 2008 actualizados al 2011), con lo cual se obtuvieron los costos de operación base para siete tipos de vehículos que se presentan en la siguiente tabla:



CONCEPTO	UNIDAD	TIPO DE VEHICULO						
		VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
		CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD
Consumo cada 1000 veh./km								
Consumo de combustible	litros	172.02	398.63	328.45	446.79	483.92	579.47	760.89
Uso de lubricantes	litros	1.85	3.37	3.37	3.37	5.45	5.45	5.45
Consumo de llantas	núm llantas nuevas equivalentes	0.06	0.26	0.15	0.22	0.33	0.39	0.56
Tiempo de operador	horas	10.68	11.47	13.09	13.41	11.48	12.21	14.20
Mano de obra de mantenimiento	horas	2.15	11.06	8.18	12.43	30.48	30.48	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.14%	0.13%	0.15%	0.21%	0.27%	0.27%	0.27%
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.40%	0.05%	0.06%	0.06%	0.05%	0.06%	0.06%
Intereses (tasa 4.82%)	% precio vehículo nuevo	0.03%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
Costos Unitarios(\$)								
Precio de vehículo nuevo	\$	189,843.53	1,883,447.00	465,371.41	549,349.75	1,032,217.62	1,072,220.38	1,265,492.87
Costo de combustible	\$/litro	9.32	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41
Costo de lubricantes	\$/litro	25.68	24.64	24.64	24.64	24.64	24.64	24.64
Costo de llanta nueva	\$/llanta	840.63	2,494.96	2,338.73	2,338.73	2,338.73	2,338.73	2,338.73
Tiempo de operador	\$/hora	23.97	68.61	46.23	46.23	55.70	55.70	55.70
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	20.68	54.92	36.19	36.19	36.19	36.19	36.19
Tasa de interés anual	%	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82
Costos indirectos por veh-km	\$	0.27	0.81	0.43	0.59	0.89	0.99	1.22
Costos de operación Base(\$ por cada 1000 vehículos-km)								
Consumo de combustible	\$	1,603.23	3,751.11	3,090.71	4,204.29	4,553.69	5,452.81	7,159.97
Uso de lubricantes	\$	47.51	83.04	83.04	83.04	134.29	134.29	134.29
Consumo de llantas	\$	50.44	648.69	350.81	514.52	771.78	912.10	1,309.69
Tiempo de operador	\$	256.00	786.96	605.15	619.94	639.44	680.10	790.94
Mano de obra de mantenimiento	\$	44.46	607.42	296.03	449.84	1,103.07	1,103.07	1,103.07
Refacciones	\$	265.78	2,448.48	698.06	1,153.63	2,786.99	2,895.00	3,416.83
Depreciación	\$	759.37	941.72	279.22	329.61	516.11	643.33	759.30
Interés	\$	56.95	188.34	46.54	54.93	103.22	107.22	126.55
Costos indirectos	\$	270.00	810.00	430.00	590.00	890.00	990.00	1,220.00
TOTAL		3,353.74	10,265.76	5,879.56	7,999.82	11,498.58	12,917.92	16,020.64
COSTO DE OPERACIÓN BASE POR VEH-KM(\$)		3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02

Fig. IV.5.1.- Costo de operación base de cada vehículo considerado en el análisis.



PRIMER TRAMO ANALIZADO

CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO:

Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Cd. Del Carmen – Puerto Real,

Subtramo: Km 12+000 al Km. 25+000.

Análisis en el tramo del km 22+000 al 25+000 (3 kilómetros).

La composición del tránsito vehicular para éste camino se tomó de los datos de la SCT del año 2010, en donde la clasificación vehicular y el TDPA son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IV1.5.2 Clasificación vehicular del tramo 1 (Datos Viales 2010).

TIPO DE VEHÍCULO	%	NÚMERO
VEHÍCULO LIGERO (A)	83.80%	3,488
AUTOBÚS (B)	2.40%	100
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	6.50%	271
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	2.40%	100
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2)	1.80%	75
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)	0.50%	21
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2-	2.60%	108
	TDPA	4,163

Índice de perfil promedio: 23.65 cm/km.

Correlación: $IRI=0.0239IP+1.3837 \dots\dots(1)$

IRI= 1.95 m/km.

La topografía que atraviesa el camino es sensiblemente plana.

Tasa anual de incremento vehicular: 10.22 %.



Para IRI del tramo analizado= 1.95 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)	
Fb	1.04	1.09	1.1	1.09	1.12	1.12	1.12	
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02	
TDPA	3,488	100	271	100	75	21	108	
DIAS	365	365	365	365	365	365	365	
C.O.A (\$/KM)	4,440,504.55	408,423.10	639,734.65	318,272.70	352,546.51	110,897.78	707,317.61	
TOTAL							C.O.A(\$/KM)	6,977,696.90

Para IRI de estado superficial regular= 4 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)	
Fb	1.1	1.15	1.26	1.24	1.23	1.23	1.23	
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02	
TDPA	3,488	100	271	100	75	21	108	
DIAS	365	365	365	365	365	365	365	
C.O.A (\$/KM)	4,696,687.51	430,905.10	732,786.96	362,071.70	387,171.61	121,789.53	776,786.30	
TOTAL							C.O.A(\$/KM)	7,508,198.71

Para IRI de estado superficial malo=6 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)	
Fb	1.18	1.21	1.42	1.35	1.34	1.34	1.34	
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02	
TDPA	3,488	100	271	100	75	21	108	
DIAS	365	365	365	365	365	365	365	
C.O.A (\$/KM)	5,038,264.78	453,387.11	825,839.28	394,190.96	421,796.71	132,681.28	846,254.99	
TOTAL							C.O.A(\$/KM)	8,112,415.11



De acuerdo con los resultados de éste trabajo de investigación, aplicado para éste tramo de la carretera Cd. del Carmen-Campeche del km 22+000 al 25+000, de los costos de operación vehicular obtenidos por kilómetro y en un año, se pueden calcular los sobrecostos que se han generado y que se deberán gastar, de acuerdo a lo siguiente:

Al pasar de un estado actual muy bueno (IRI=1.95 m/km) a regular (IRI=4 m/km), se originará un incremento en los costos de operación de: **\$ 530,501.81 / km / año (7.06%)**.

Y, por otro lado, al pasar de un estado regular (IRI=4 m/km) a un estado malo en la superficie de rodamiento (IRI=6 m/km), se generará otro incremento en los costos de operación de: **\$ 604,216.40/ km / año (7.45%)**.

SEGUNDO TRAMO ANALIZADO

Carretera: Cd. Del Carmen – Campeche, Tramo: Isla Aguada – Champotón, Subtramo: Km. 130+000 al Km. 138+000.

Análisis en el tramo del km. 135+300 al km. 138+000.

La composición del tránsito vehicular para éste camino se tomó de los datos de la SCT del año 2010, en donde la clasificación vehicular y el TDPA son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IV1.5.3.- Clasificación vehicular del tramo 1 (Datos Viales 2010).

TIPO DE VEHÍCULO	%	NÚMERO
VEHÍCULO LIGERO (A)	65.90%	1,901
AUTOBÚS (B)	4.50%	130
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	9.10%	263
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	5.50%	159
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2)	7.70%	222
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)	1.50%	43
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2-	5.80%	167
TDPA		2,885



Índice de perfil promedio: 27.62 cm/km.

Correlación: $IRI=0.0239IP+1.3837 \dots\dots(1)$

IRI: 2.05 m/km.

Tasa anual de incremento vehicular: 2.94 %.

Para IRI del tramo analizado=2.05 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.04	1.09	1.11	1.1	1.13	1.13	1.13
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	1,901	130	263	159	222	43	167
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	2,420,125.90	530,950.03	626,493.58	510,696.29	1,052,854.96	229,103.88	1,103,487.97
TOTAL C.O.A(\$/KM)							6,473,712.62

Para IRI de estado superficial regular= 4 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.1	1.15	1.26	1.24	1.23	1.23	1.23
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	1,901	130	263	159	222	43	167
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	2,559,748.55	560,176.64	711,154.88	575,694.00	1,146,027.97	249,378.56	1,201,141.78
TOTAL C.O.A(\$/KM)							7,003,322.37



Para IRI de estado superficial malo= 6 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.18	1.21	1.42	1.35	1.34	1.34	1.34
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	1,901	130	263	159	222	43	167
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	2,745,912.08	589,403.24	801,460.26	626,763.63	1,248,518.27	271,680.71	1,308,560.96
						TOTAL C.O.A(\$/KM)	7,592,299.16

De acuerdo con los resultados de éste trabajo de investigación aplicado para éste tramo de la carretera Cd. del Carmen-Campeche, tramo isla aguada a Champotón del km 135+300 al 138+000, de los costos de operación vehicular obtenidos por kilómetro y en un año, se pueden calcular los sobrecostos que se han generado y que se deberán gastar, de acuerdo a lo siguiente:

Al pasar de un estado actual muy bueno (IRI=2.05 m/km) a regular (IRI=4 m/km), se originará un incremento en los costos de operación de **\$ 529,609.75/ km /año (7.56%)**.

Y por otro lado, al pasar de un estado regular (IRI=4 m/km) a un estado malo en la superficie de rodamiento (IRI=6 m/km) se generará otro incremento en los costos de operación de: **\$ 588,976.79 / km / año (7.75%)**.



TERCER TRAMO ANALIZADO

En el tramo que se analizó el índice de perfil anteriormente se habían pasado trabajos de construcción de dos cuerpos nuevos paralelos entre sí, aprovechando parte del ya existente de 10.50 m. de corona en cada uno, del km 10+0000 al km 20+000, de la Carretera Campeche-Mérida, Tramo: Campeche – límites de estado con Yucatán, Subtramo: Km. 10+000 al Km. 20+000.

Análisis en el tramo del km. 10+000 al km. 13+500.

La composición del tránsito vehicular para éste camino se tomó de los datos de la SCT del año 2010, en donde la clasificación vehicular y el TDPA son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla IV1.5.4.- Clasificación vehicular del tramo 1 (Datos Viales 2010).

TIPO DE VEHÍCULO	%	NÚMERO
VEHÍCULO LIGERO (A)	76.90%	6,053
AUTOBÚS (B)	5.60%	441
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	4.90%	386
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	2.90%	228
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2)	4.80%	378
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S3)	1.00%	79
CAMIÓN ARTICULADO (T3-S2-	3.90%	307
	TDPA	7,872

Índice de Perfil Promedio: 73.82 cm/km.

Correlación: $IRI=0.0239IP+1.3837 \dots\dots\dots(1)$

IRI=3.1479 m/km.

Tasa de Crecimiento Anual=6.70%.



Para IRI del tramo analizado= 3.15 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.07	1.12	1.18	1.14	1.18	1.18	1.18
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	6,053	441	386	228	378	79	307
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	7,928,243.05	1,850,718.69	977,478.49	758,949.00	1,872,021.95	439,536.20	2,118,327.34
TOTAL C.O.A(\$/KM)							15,945,274.73

Para IRI de estado superficial regular= 4 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.1	1.15	1.26	1.24	1.23	1.23	1.23
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	6,054	441	386	228	378	79	307
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	8,151,876.77	1,900,291.51	1,043,748.22	825,523.47	1,951,344.92	458,160.62	2,208,086.98
TOTAL C.O.A(\$/KM)							16,539,032.48

Para IRI de estado superficial malo= 6 m/km

VARIABLES	VEHICULO LIGERO(A)	AUTOBUS (B)	CAMION DE 2 EJES (C2)	CAMION DE 3 EJES (C3)	CAMION ARTIC.(T3-S2)	CAMION ARTIC.(T3-S3)	CAMION ARTIC.(T3-S2-R4)
Fb	1.18	1.21	1.42	1.35	1.34	1.34	1.34
CB	3.35	10.27	5.88	8.00	11.50	12.92	16.02
TDPA	6,054	441	386	228	378	79	307
DIAS	365	365	365	365	365	365	365
C.O.A (\$/KM)	8,744,740.53	1,999,437.15	1,176,287.68	898,755.40	2,125,855.44	499,134.33	2,405,558.17
TOTAL C.O.A(\$/KM)							17,849,768.69



De acuerdo con los resultados de éste trabajo de investigación aplicado para éste tramo de la carretera Campeche-Mérida del km 10+000 al 13+500, de los costos de operación vehicular obtenidos por kilómetro y en un año, se pueden calcular los sobrecostos que se han generado y que se deberán gastar, de acuerdo a lo siguiente:

Al pasar de un estado actual que no pasa la norma (IRI=3.15 m/km) a regular (IRI=4 m/km), se originará un incremento en los costos de operación de **593,757.75 / km/año (3.59%)**.

Y, por otro lado, al pasar de un estado regular (IRI=4 m/km) a un estado malo en la superficie de rodamiento (IRI=6 m/km) se generará otro incremento en los costos de operación de: **1, 310,736.21/ km /año (7.34%)**.

CONCLUSIÓN DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN DE LOS ANALIZADOS

Para concluir con éste subtema, es importante mencionar que los cálculos representativos de situaciones reales permiten afirmar que el gasto adicional por kilómetro, debido a la ausencia de una conservación eficaz (falta de conservación ó conservación inadecuada), cubre con suficiencia los montos necesarios para mantener índices de servicio altos (regularidades bajas), por periodos razonablemente prolongados,

Un ahorro “ficticio” aplicando acciones de conservación baratas, que no resuelven los problemas a fondo en la conservación de las carreteras, pero que alcanzan para “hacer algo” en un mayor número de kilómetros, está costando muchos millones de pesos a los usuarios, al Estado de Campeche y al País, debido a los altos costos de operación que impactan a los usuarios.



Finalmente, las carreteras analizadas nos da un panorama de lo que está sucediendo en la mayoría de las carreteras de jurisdicción estatal, y que si sumamos los costos de operación vehicular de forma total, podemos deducir fácilmente que estos costos son muy superiores a los que se destinan para su conservación, dando como resultado que se acentúe más su deterioro a través del tiempo y, por consiguiente, el usuario, el gobierno del Estado de Campeche y el País, deberán pagar más recursos económicos al transitar por estas carreteras.



CAPÍTULO V.

RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL ÍNDICE DE PERFIL

INFLUENCIA DE LA PUESTA EN OBRA DE LA MEZCLA ASFALTICA

La regularidad superficial de un pavimento asfáltico viene definida, inicialmente, por el acabado que consigue en la puesta en obra de las capas de mezcla asfáltica, que depende de manera directa del funcionamiento de la regla extendedora de la pavimentadora (finisher).

La regla extendedora funciona de manera flotante sobre el material que extiende, mediante un equilibrio de fuerzas, en el que influye, de manera fundamental, la velocidad de avance de la máquina.

Mantener una velocidad de avance de la extendedora o pavimentadora constante, facilita conseguir una buena regularidad superficial de la capa construida.

Otro factor, que influye en la sustentación de la regla, es la temperatura de la mezcla y su capacidad portante, siendo en éste sentido, aconsejable mantener la temperatura homogénea en toda la mezcla y evitar segregaciones de la misma.

El ángulo de ataque de la regla sobre el material que fluye bajo ella determinara si la regla tiene tendencia a subir, incrementando el espesor de la capa, a mantenerse, situación de equilibrio en la que no se puede modificar el espesor de la capa, o a hundirse, reduciendo el espesor de la capa.



Las reglas pueden disponer además de un sistema propio de compactación basado en un tamper simple o doble, a la entrada de la misma, así como en vibradores de superficie en la regla.

Si la pavimentadora está equipada con rueda neumática, se debe revisar la condición y presión de estas. Es muy importante que la presión sea la misma en la rueda de ambos lados de la pavimentadora. Si la pavimentadora se mueve sobre orugas, se deben revisar las ruedas dentadas para asegurar que estén ajustadas sin holgura y también se deben revisar las ruedas dentadas para ver si presentan demasiado desgaste. Las orugas sueltas y las presiones desiguales o falta de presión en los neumáticos de las ruedas puedan causar indeseados en la pavimentadora, estos movimientos serán transmitidos a la unidad de enrase, produciendo, así, una superficie irregular del pavimento. Es importante que no deba haber acumulación de material en las ruedas o en las orugas.

Los factores principales que pueden influir en el equilibrio de fuerzas, que determinan la sustentación de la regla extendedora, son las siguientes.

- **Irregularidades de la base.**
- **Cambios en la velocidad del tendido y paradas en la pavimentadora.**
- **Heterogeneidad de la mezcla asfáltica.**
- **Volumen de la mezcla frente a la regla y movimiento de tornillos sinfines.**
- **Compactación de la mezcla asfáltica en la obra.**



Fig. V.1.- Pavimentadora en operación (Fuente: Constructora CUCSA).

➤ **Irregularidades de la base**

La regularidad final de una capa de mezcla asfáltica está muy relacionada con la homogeneidad del espesor de la misma, en toda su superficie, tanto longitudinal como transversalmente.

La compactación de la capa (tanto la puesta en obra, como la de post compactación producida por el tránsito), producirá, de modo proporcional, una reducción del espesor inicial de extendido que, si presenta variaciones producidas, afectará el índice de perfil.

Es evidente que si se tiene una base irregular, se va a tener una capa posterior con similares características de regularidad superficial, por lo cual se deben elegir medidas específicas, previas o complementarias en el extendido como las siguientes:

❖ Maximizar la precompactación de capa por la regla

Esto puede lograrse combinando reglas con dispositivos eficaces de alta compactación con una velocidad muy reducida de extendido, esto traerá afectaciones directamente con el rendimiento y evidentemente con los costos.



❖ Microfresado de corrección del perfil

Con éste sistema se da una corrección longitudinal buena, ya que se puede mejorar la superficie de la base, mediante esta conocida técnica; dado que no se trata de una capa de acabado, no es imprescindible usar un tambor específico de micro fresado.



Fig.V.2.- Microfresado de corrección de perfil (Fuente: Pagina web del grupo OHL).

➤ **Cambios en la velocidad del tendido y paradas en la pavimentadora**

Para comprender cuales son los factores que influyen en la posición de la regla extendedora y como se ve si esta está alterada en su posición, es útil entender cómo funciona esta.

Existe un equilibrio de fuerzas que sostienen a la regla en la posición deseada, sobre la mezcla que se está extendiendo, resultado de la combinación entre la tendencia de aquella a hundirse en el material debido a su peso y al efecto de la vibración y la resistencia de esta a ser compactada, función de las características propias de la mezcla asfáltica que, a su vez, dependen de la temperatura y la energía transmitida a la misma por la vibración de la regla y el movimiento de los tornillos sinfines.

La resistencia que ofrece la mezcla a ser compactada se ve influenciada por la velocidad de la extendedora. A mayor velocidad de tendido, la deformación plástica y visco-elástica,



debidas al peso y al efecto de la vibración de la regla, se reducen al mismo tiempo que el periodo de permanencia de la regla sobre una sección determinada.

Las habituales paradas por cambio de camión de volteo o las causadas por una falta de suministro de mezcla, provocan, por lo general, que la pavimentadora se detenga por completo, manteniendo el frontal de la regla extendedora cargado de mezcla hasta el inicio de la marcha.

En cada final de camión, se vuelca sobre la tolva de la extendedora la porción más segregada, tanto termina como granulométricamente, de todo el contenido del camión; a esto se le añade, en muchos casos una maniobra de cierre de la tolva de la extendedora con lo que se aumenta la proporción de la mezcla segregada.

Se han utilizado diversos procedimientos para conseguir un buen índice de perfil, entre los más utilizados y que han dejado buenos resultados, son los que se mencionan a continuación:

Transfer

Se trata de dispositivos que se sitúan entre el camión y la extendedora, y que permiten regular en cierta medida la velocidad de la misma, al menos evitar paradas prolongadas entre camiones consecutivos, dan cierta continuidad a la alimentación y sobre todo evitan el impacto del camión sobre la extendedora.

Silo Móvil

Éste dispositivo reúne las mismas ventajas que el transfer y además las mejora, porque tiene otra característica muy importante, como es la capacidad de re-homogeneizar la mezcla asfáltica, tanto en cuanto a su granulometría como a la temperatura de la misma.



Esta es la mejor opción, de las 2 mencionadas, porque el empleo de un silo móvil en el extendido de la mezcla asfáltica en caliente, permite la eliminación de todos los efectos malos debidos a cambios de velocidad paradas y enfriamiento de la mezcla que están ligados al sistema convencional de alimentación del extendido.



Fig. V.3.- Silo móvil (Fuente: interespresas.net).

➤ **Heterogeneidad de la mezcla**

Dentro de la heterogeneidad de la mezcla, se tratara sobre la influencia de las características generales de la mezcla en el resultado final del extendido y, por lo tanto, del Índice de Perfil.

Dentro de los puntos más importante, a consideración, en la formulación de los componentes de la mezcla asfáltica son los siguientes:

La temperatura de la mezcla es la que marca la viscosidad del asfalto y, por tanto, la manejabilidad del conjunto. Un exceso en la temperatura puede producir mezclas muy deformables, inestables y endebles ante el sistema de compactación utilizado. Por lo contrario, temperaturas bajas, nos darán mezclas difíciles de extender y compactar a la vez, que pueden producir irregularidades en su puesta en obra.



La temperatura óptima de puesta en obra viene determinada por las características del asfalto, así para los asfaltos convencionales suele ser correspondiente a una viscosidad cinemática próxima a 280 cSt (2.8 — , mientras que para los asfaltos modificados es convenientes seguir las indicaciones del proveedor mismo.

La SCT a través de su normativa para carreteras en particular la denominada como N-CMT-4-05-003/02, propone temperaturas de mezclado para mezclas en caliente.

Clasificación del cemento asfáltico	Temperatura de mezclado °C
AC- 5	120 - 145
AC-10	120 - 155
AC-20	130 - 160
AC-30	130 - 165

Al igual que en el caso de la temperatura, una granulometría heterogénea puede producir prácticamente los mismos efectos, por lo que habrá que cuidar, tanto la mezcla en la planta como su proceso de carga en los camiones que deberá realizar varios montones para evitar segregaciones de los gruesos.

Dicho anteriormente, para mejorar la homogeneidad, tanto de temperatura como la granulometría de la mezcla, se puede utilizar, por ejemplo, un sistema de transferencia de silo móvil.

➤ **Volumen de la mezcla frente a la regla y movimiento de tornillos sinfines**

En las extendedoras modernas es bastante fácil mantener un nivel uniforme del material por delante de la regla, ya que incorporan sistemas automáticos de alimentación que permiten ajustar proporcionalmente las revoluciones de los alimentadores.



En varias ocasiones, las causa de las diferencias de volumen de material frente a la regla, son los mismos operadores de las pavimentadoras, ya que en algunas ocasiones apuran en exceso las tolvas entre viaje y viaje, causando irregularidades superficiales y diferencias en la textura de la capa extendida.

Hablando sobre el movimiento de los tornillos sinfines, una recomendación es que la parte inferior de la hélice del tornillo sin fin siempre esté por lo menos a 50 mm por encima de la superficie que se está extendiendo y será algo mayor si se extienden mezclas con agregados pétreos de tamaño superior a 25 mm.

Si el sinfín va más abajo, el material puede quedar pre-compactado por el giro de éste, haciendo que fluya intermitentemente y dejando una superficie irregular, que afecta directamente al índice de perfil.

Otra recomendación de los sinfines, es ajustar su velocidad de giro, con los cuales los regímenes estarán entre 0 y 120 R.P.M. esta operación es relativamente sencilla, se trata de distribuir el materia según las necesidades del momento, de forma que la marcha de los sinfines sea lo más continua posible y sin tiempo de parada. Esto permitirá conseguir lo que se busca, que es, en definitiva, llevar un flujo de material adecuado, constante, y que evite la segregación del mismo.



Fig. V.4.- Movimiento de tornillo sinfín de la pavimentadora (Fuente: fotografía propia del autor).

➤ **Compactación de la mezcla asfáltica en la obra**

La compactación sirve para aumentar la densidad de la mezcla, disminuyendo su contenido de vacíos, pero, siendo homogénea la compactación, si la capa sobre la cual actúa no lo es, quedara irregularmente compactada y, por consiguiente, con un índice de perfil deficiente o, si el índice de perfil inicial resultante fuere satisfactorio, tendería a deteriorarse a corto plazo, con el paso del tránsito pesado y la compactación que éste produce.

En general, deben utilizarse mezclas poco deformables y compactables, ricas en agregado grueso, duro y de producto de trituración; se deben compactar mediante el uso de compactadores potente, que desarrollen una gran energía de compactación, de tal manera que la mezcla sea ya poco sensible a la acción del tránsito y, que por tanto, su proporción de vacíos permanezca casi inalterable.

La maquinaria de compactación que se debe emplear debe de estar compuesta, preferentemente, por equipo de rodillos metálicos lisos, dotado de vibración cuando se trate de capas gruesas y sin vibración cuando se trate de carpetas delgadas, y compactadores de neumáticos con media o alta presión.



Normalmente se comienza el proceso de compactación con rodillos vibratorios, salvo para capas muy delgadas y se termina con compactadores de neumático con presión elevada (entre 0.8 y 1 Mpa). En otros casos, se comienza con compactadores de neumáticos en capas con cierto espesor, pero con una presión inicial baja de entre 0.3 y 0.4 Mpa, aumentándola según progresa la compactación. Los rodillos metálicos son adecuados, en la fase final, para eliminar marcas o defectos dejados en la superficie por las otras máquinas.

Una adecuada compactación proporcionara una regularidad superficial adecuada, que no sólo debe de cuidarse en la capa de rodadura, sino también en las capas inferiores. Para conseguir una buena compactación y acabados óptimos necesitamos, además de los medios adecuados, se debe tener una gran calidad en las características de la mezcla asfáltica.

Algunas recomendaciones para lograr una buena compactación serían las siguientes:

La velocidad de todos los rodillos debe de ser uniformes y no deben de haber cambios de trayectorias ni de sentido. Las ruedas motoras, especialmente en las rampas, deben de ser las más próximas a la extendedora, para evitar desplazamiento.

Es importante también, para evitar desplazamientos con rodillos vibratorios y conseguir un buen índice de perfil, que la relación entre el peso del rodillo (P), el ancho del tambor (B) y su diámetro (ϕ) no sea mayor de 0.25:

Con tambores de pequeño diámetro, el riesgo de desplazamiento aumenta, junto con el de conseguir un índice de perfil no satisfactorio.

Otra recomendación sería que, se debe de comenzar a compactar por la parte más baja, avanzando hacia la zona más elevada, traslapando en pasadas sucesivas.



Para que no haya discontinuidades de las juntas longitudinales, primero se debe de apoyar la maquina en la franja ya compactada, menos 15 o 20 cm, que se apoyaran sobre la franja recién extendida, aumentándose en pasadas sucesivas, esta anchura, hasta que todo el ancho de la maquina quede sobre la mezcla reciente. Si las juntas son transversales, el sistema debe de ser el mismo, aunque colocando la maquina transversalmente.

La velocidad es muy importante cuando se usa la vibración, porque aumentando la velocidad, la distancia entre impactos de vibración aumenta y en consecuencia, la compactación disminuye, por lo que se requerirá mayor número de pasadas. La velocidad recomendada es de 3 a 5 km/h.



Fig. V.5.- Compactadora tipo rodillo en operación (Fuente: Pagina web de la constructora grupo OHL).

En resumen, a todo esto, la SCT propone a través de su normativa los siguientes aspectos, de acuerdo a la norma N-CTR-CAR-1-04-006/08, estableciendo que las pavimentadoras deberán ser:



1. Autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la capa de carpeta asfáltica que se extienda.
2. Equipadas con un enrasador que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancia o canalizaciones.
3. Tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con sistema de distribución mediante el cual se reparta la mezcla uniformemente frente al enrasador; y sensores de control automático de niveles.
4. Los dispositivos externos que se utilizan como referencia de nivel para los sensores de niveles, estarán colocados en zonas limpias de piedras, basura o cualquier otra obstrucción que afecte las lecturas.
5. Adicionalmente, es necesario contar además con un equipo especial para verter la mezcla asfáltica a la pavimentadora evitando que el camión vacíe directamente a la tolva de la misma.
6. Es recomendable minimizar las paradas y arranques de la pavimentadora.
7. La tolva de descarga de la pavimentadora deberá permanecer llena, con el objetivo de evitar la segregación.



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE PERFIL CON EL TIEMPO DE VIDA DE UN PAVIMENTO

Usualmente se considera que el IP aumenta gradualmente con el tiempo, a partir de cierto valor inicial , y se va incrementando por un lado, debido a los deterioros superficiales , provocados principalmente por: el tránsito, los agentes meteorológicos, características de los materiales y la capacidad estructural del pavimento. Por otro lado, el efecto de los cambios de temperatura dependiendo de la zona climática. Y por último, y de forma destacada en nuestro entorno, contribuyen a modificaciones de los valores de IP una serie de factores relacionados con los cambios volumétricos del terreno de cimentación , como pueden ser terrenos de alta plasticidad, suelos expansivos, fallas geotécnicas, asentamientos diferenciales.

Dicho lo anterior, podemos deducir una expresión que relacione lo mencionado para evaluar el IP durante la vida útil del pavimento, se muestra a continuación:

$$= + + +$$

Esta expresión depende de una serie de factores como son el terreno de cimentación del pavimento, la regularidad inicial, las condiciones meteorológicas y la acción del tránsito.

Dado su carácter empírico se hace necesario la determinación, para cada región y estructura de pavimento, de una ecuación propia.



CAPÍTULO VI.

CONCLUSIONES

- La regularidad superficial de un pavimento es una característica muy importante dentro de la evaluación del estado superficial de una carretera, ya que afecta directamente a la comodidad y seguridad del usuario, así como los costos de operación. El buen estado de la infraestructura carretera resulta vital para la eficiencia del transporte, el cual tiene una influencia preponderante en el estado general de la economía del país.
- En una construcción o reconstrucción en la capa superior de un pavimento y fundamentalmente en la terminación de la superficie de rodamiento, permitirá que los costos de operación sean mayores o menores. Lo anterior se generará desde el momento en que se ponga en operación el tramo, así como de los incrementos a lo largo de la vida útil del mismo.
- El nivel de rugosidad de la superficie de rodadura se estima mediante el índice internacional de rugosidad (IRI), que oficialmente se mide con un equipo Mays Meter, a 80 km/h. Sin embargo, cuando se trata de trabajos de conservación, en los que el tramo de tendido y compactación de la carpeta asfáltica en un día de trabajo no alcanzan la longitud necesaria para desarrollar la velocidad referida, es imposible utilizar el Mays Meter, por lo que, para fines de aceptación o rechazo se considera la rugosidad en términos del índice de perfil (IP) que se obtiene con un perfilógrafo tipo California.
- En nuestro país es necesario hacer obligatorio el uso del Índice Internacional de Rugosidad para una mejor evaluación del estado superficial de los pavimentos.



Conviene dejar de evaluar subjetivamente las carreteras con el Índice de Servicio Actual, para ello en nuestro país se cuenta con el equipo automatizado (tales como el Mays Meter o el Perfilografo California) necesario para empezar a obtener el IRI o IP en la red nacional de carreteras.

- Es importante mencionar que existe la necesidad de verificación de los diferentes equipos que determinan la regularidad superficial en instituciones reconocidas para tal fin como lo es el Instituto Mexicano del Transporte, lo anterior con la finalidad de asegurar la obtención de buenos resultados confiables a la hora de analizar el perfil de una carretera.
- No cabe la menor duda que aspectos como la homogeneidad de la mezcla a utilizar, tanto en su granulometría como en su temperatura, así como de revisar las partes de la pavimentadora y una adecuada compactación de las mezclas asfálticas, son determinantes para mejorar la regularidad superficial.
- Para mejorar la terminación superficial, es necesario tomar en cuenta también, las juntas transversales en el pavimento. Se pudo apreciar en los tramos analizados, que en éste punto de las juntas transversales, es donde los índices de perfil son mayores.
- También es importante la disposición de un equipo humano suficiente y bien preparado, además que tenga un conocimiento sobre los aparatos que miden la regularidad superficial, ya que a partir de datos de entrada al aparato se puede modificar totalmente el perfil de una carretera, tal es el caso del perfilografo california, ya que si al modificar datos de entrada como la longitud del filtro, cambia totalmente el índice de perfil.
- En consecuencia de los beneficios y economías que obtienen los usuarios de las carreteras, por disponer de una buena regularidad superficial de los pavimentos (mayor vida útil del pavimento, menor índice de accidentes, menores costos de conservación, menores costos de operación, etc.) la SCT, como institución gubernamental, debería



bonificar a la empresa constructora cuando se consiguen valores inferiores de IP a los mínimos exigidos, al igual que, esté sea penalizando cuando no se alcanzan dichos valores mínimos del IP. Esto con el fin de que se modifique la Ley de Obra Pública y Servicios relacionados con las mismas, así como su reglamento, ya que actualmente no se estipula ninguna bonificación con algún concepto de obra.



Bibliografía

Sayers.M.W. Gillespie.T.D. y Queiroz A.V. 1986. The International Road Roughness Experiment World Bank Technical Paper Number.

American Concrete Pavement Association. The International Roughness Index (IRI): What is it? How is it Measured? What do you need to know about it?. R&T Update Concrete Pavement Research & Technology (Ago 2002).

Sayers, MW, Karamihas, SM. The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan Transportation Research Institute (1998).

Programa Nacional de Infraestructura 2007-2012 Pag. Web www.infraestructura.gob.mx/

Ingeniería de Transito y Carreteras, Nicholas J. Garber/Lester A.Hoel, tercera edición, editorial Thomson.

Diseño de Pavimentos Flexibles (Primera y Segunda Parte), Manuel Zarate Aquino, segunda edición, Asociación Mexicana de Asfalto A.C.

Estructuración de vías terrestres. Olivera Bustamante Fernando Editorial Patria, segunda Edición. México.1996.

Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos, A. Rico, R. Téllez, M. Elizondo Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico 3, 4 y 5 1991.



La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el Índice Internacional de Rugosidad

J. A. Romero Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica 67.1996.

Manual for profile measurement: Operational field guidelines SHRP P-378 National Research Council 1994.

Sistema de evaluación de pavimentos versión 2.0, Juan Manuel Orozco y Orozco, Rodolfo Téllez Gutiérrez, Ricardo Solorio Murillo, Alfonso Pérez Salazar, María, Ariadna Sánchez Loo Sandra Torras Ortiz Publicación Técnica No 245 2004.

“Estado de arte sobre IRI”, Andrés Costa Hernández, 2ºda Jornada Técnica de ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas) Madrid, España 2006.

“Aspectos clave en el diseño y la puesta en obra de Mezclas bituminosas, Carlos Olavarría Jiménez, 3º Jornada Técnica de ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas) Madrid, España 2006.

“Regularidad Superficial en carreteras de reciente construcción “Pedro Yarza Álvarez, Ramón Crespo del Río, Aepo Consultores, Madrid España, 2007.

“Calidad ante la Rodadura” Ramón Crespo del Río, Aepo Consultores, Jornada sobre la calidad en el Proyecto y la Construcción de Carreteras, Barcelona 1999.

Conservación de carreteras federales libres de peaje, Arturo Manuel Monforte Ocampo, Dirección general de Conservación de Carreteras, SCT, 2008.



Aguerreberre Salido, R., Cepeda Narváez, F., Publicación Técnica No. 20 “Elementos de Proyecto y Costos de Operación en Carreteras”, Instituto Mexicano del Transporte, México, 1991.

Al-Balbissi Adli H. Economics of Pavement Condition, Axle Load, and Vehicle Operating Costs. ITE Journal (May 1991).

Maser Kenneth R, Markow Michael J. Measuring Systems and Instrumentation for Evaluating the Effectiveness of Pavement Maintenance. Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, DC (1991).

Aguerreberre Salido, R., Cepeda Narváez F., Publicación Técnica No. 30, “Estado Superficial y Costos de Operación en Carreteras”, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, 1991.

Durán, G., Modelo VOCMEX, Traducción de Vehicle Operating Costs Model, versión 3.0, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México, 1994.

International Institute for Management Development (IMD), World Competitiveness Yearbook 2006.

Efecto de la regularidad superficial en la capacidad vial de autopistas y carreteras multicarril mexicanas, Rafael Gallegos, López Alberto Mendoza Días, publicación técnica no 262, 2004.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Datos viales 2010. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos (2010).



Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008, José Antonio Arroyo Osorno, Roberto Aguerrebere Salido, Guillermo Torres Vargas. *Publicación Técnica No. 316 Sanfandila, Qro, 2008.*

Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes M-MMP-4-07-002, Índice de Perfil 2006.

Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CTR-CAR-1-04-006, Carpetas asfálticas con mezclas en Caliente 2006.

Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CTR-CAR-1-04-007, Carpetas asfálticas con mezclas en Frio 2006.

Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N-CMT-4-05-003, Calidad en mezclas Asfálticas en Carreteras 2006.

Norma ASTM E 1364 Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method.

Norma ASTM E 1274 Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph.