UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE POSGRADO

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INFRAESTRUTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

AUTOR
ING. IGNACIO OBDULIO HERNÁNDEZ LÓPEZ

ASESOR
DR. JORGE ALARCON IBARRA

Agosto 2007

ÍNDICE

Agradecimientos 5
Objetivos y Alcances 6
Abreviaturas 8
Índice de figuras 9
Índice de tablas 11

CAPÍTULO I
ANTECEDENTES

Los perfiles y los perfilómetros 12
Métodos manuales 16
Análisis de perfiles 18
Relaciones experimentales para la interpretación de los índices 19
- Calidad del viaje
- Cargas dinámicas en el pavimento
- Comportamiento funcional del pavimento
- Comportamiento estructural de los pavimentos

En México 23

CAPÍTULO II
LA RUGOSIDAD Y UNIFORMIDAD EN EL PAVIMENTO

La rugosidad del camino 26
Opinión del usuario de la calidad del viaje 26
Beneficios de la uniformidad del pavimento 28
Cargas dinámicas en los pavimentos 28
Efectos de la uniformidad inicial en la uniformidad futura 30
Efecto de la uniformidad inicial en la vida del pavimento 32
Efecto de la uniformidad del pavimento en los costos de mantenimiento de un vehículo 33

CAPÍTULO III
ÍNDICES DEL PERFIL

Introducción 35
Índice de Rugosidad Internacional 36
- Introducción
- Propiedades del análisis del IRI
- Cálculo del IRI
- Requerimientos del equipo
- Rangos de rugosidad en la escala del IRI
- Métodos de medición de la rugosidad
  - Clase 1: Perfiles de precisión
  - Clase 2: Otros métodos perfilómetricos

Clase 3: Estimación del IRI con ecuaciones de correlación
Clase 4: Valores subjetivos y medidas sin calibrar
Número de Viaje 45
Introducción
Propiedades de los análisis del Número de Viaje
Cálculo del Número de Viaje
Requerimientos del equipo
Índice de Perfil 48
Introducción
Perfilar el trazo del perfil
Posición de la banda de borrado
Determinación del Índice de Perfil

CAPÍTULO IV
EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

Introducción 53
Response Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS) 54
Tipos de equipos
Rugosimetro del Bureau of Public Roads (BPR)
Medidor Mays
Medidor del camino PCA
Desventajas de los RTRRMS
Perfilómetros inerciales de alta velocidad 59
Dynatest
International Cybernetics Company (ICC)
Infrastructure Management Services (IMS)
K. J. Law Engineers
Pathway
Roadware
Perfilógrafos 66
Perfilógrafo de California
Perfilógrafo Ames
Perfilógrafo Rainhart
Perfilómetros ligeros 70
Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA)
International Cybernetics Corporation (ICC)
K. J. Law Engineers
Dispositivos manuales 73
Estadal y Nivel
Dipstick
Walking Profiler

CAPÍTULO V
LA NULL BAND EN EL PERFILÓGRAFO DE CALIFORNIA

Introducción 76
Antecedentes 77
Aplicación en México 78
Funcionamiento del equipo 81
Tramos experimentales en la red carretera 82
Autopista Morelia-Salamanca
Carretera Morelia-Quiroga-EC Teremendo
Conclusiones 88

CAPÍTULO VI
INFLUENCIA DE LA CALIDAD SUPERFICIAL EN LOS COSTOS DE OPERACIÓN DE LAS CARRETERAS

Introducción 90
Correlación Índice de Perfil-Índice de Rugosidad Internacional 91
Costos de Operación 93
Evaluación de la rugosidad superficial en la autopista Morelia-Salamanca 95
Determinación de los costos de operación en la autopista Morelia-Salamanca 97
Evaluación de la rugosidad superficial en la carretera México-Toluca 99
Determinación de los costos de operación en la carretera México-Toluca 101
Conclusiones 103

ANEXOS

Anexo I Levantamiento de campo y análisis para la correlación IP-IRI 105
Anexo II Norma ASTM E 1364-95, Método de prueba estándar para medir la rugosidad de caminos por el método de nivel estático 129
Anexo III Norma ASTM E 1148-92, Método de prueba estándar para la calibración de sistemas usados para medir la respuesta vehicular a la rugosidad de pavimentos 141
Anexo IV Norma ASTM E 1926-98, Método de prueba estándar para calcular el índice de rugosidad internacional de caminos a partir de las mediciones del perfil longitudinal 158
Anexo V Norma ASTM E 1274-88, Método de prueba estándar para medir la rugosidad del pavimento usando un perfilógrafo 165

BIBLIOGRAFÍA

172

AGRADECIMIENTOS

OBJETIVOS Y ALCANCES

Hemos visto que en diversos países como Estados Unidos o España, por solo citar a algunos, los estudios de la funcionalidad de los pavimentos se ha vuelto algo indispensable en la mayoría de las construcciones de pavimentos, como la característica principal por la que los que transitamos por las carreteras juzgamos si son buenas o malas.

En nuestro país, se ha tomado esta idea y se han adquirido diversos equipos que permiten verificar la calidad superficial de las carreteras, desde su construcción, hasta ver su comportamiento a través del tiempo. Estos equipos son el Perfilógrafo Longitudinal Tipo California, para la calidad inicial, y el equipo de tipo respuesta Mays Meter, que permite monitorear a través del tiempo el comportamiento funcional de los pavimentos.

El perfilógrafo, equipo de bajo rendimiento, se esta incorporando recientemente en los contratos de trabajos de supervisión de calidad de nueva construcción, aunque la normatividad para la ejecución de trabajos con este equipo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes haya aparecido hace más de seis años. De diversas experiencias en el manejo del equipo se ha observado que existen aún muchas dudas de su aplicación y de los resultados que presenta; es decir, ¿Qué es el Índice de Perfil?, ¿Porqué los conteos se acumulan?, ¿Qué significa el Perfilógrama?, ¿Qué representa el valor de la Null Band?, entre otros.

A través de la presente tesis, se analizará a fondo el funcionamiento del Perfilógrafo de California y verificaremos, si efectivamente representa un equipo que pueda darnos idea de la calidad superficial o regularidad con la que se construyen los pavimentos y si es un parámetro valido para su uso, además también se investigará que representa el valor de la Null Band y en que puede afectar el valor final del Índice de Perfil.

El otro método de evaluación será el que se lleva a cabo para obtener el Índice de Rugosidad Internacional, es decir, investigar a fondo el procedimiento de calibración desde la obtención del perfil topográfico mediante estadal y nivel hasta su correlación con el equipo de respuesta Mays Meter. Se tiene conocimiento que a la fecha la Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT ha dejado de usar este equipo por presentar resultados muy imprecisos.

Así de esta manera los objetivos que se plantean son el de verificar la metodología y funcionamiento de los equipos antes señalados, a fin de esclarecer y poder aportar al conocimiento del área funcional de los pavimentos en nuestro país y señalar si son adecuados para tomar decisiones para la conservación y mantenimiento de las carreteras.

El alcance para cada uno de las investigaciones será:

1. Analizar e interpretar el valor de la Null Band en el Perfilógrafo.
2. Obtener la correlación Índice de Perfil-IRI Topográfico, para usar el equipo de tipo respuesta en una mayor longitud de carreteras.
3. Analizar que efecto tiene la calidad superficial en los costos de operación de las carreteras.

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AASHO	American Association of State Highway Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
AC	Asphalt Concrete
ARRB	Australian Road Research Board
ARS	Average Rectified Slope
QI	Brazilian Quarter Index
BPR	Bureau of Public Roads
DLC	Dynamic Load Coefficient
DLI	Dynamic Load Index
ESALs	Equivalent Single Axle Loads
FHWA	Federal Highway Administration
GMR	General Motors Research
HCS	Half Car Simulation
HPMS	Highway Performance Monitoring System
IP	Índice de Perfil
IMS	Infrastructure Management Services
IMT	Instituto Mexicano del Transporte
ICC	International Cybernetics Company
IRRE	International Road Roughness Experiment
IRI	International Roughness Index
LISA	Lightweight Inertial Surface Analyzer
LTPP	Long Term Performance Pavement
MPR	Mean Panel Ratings
MDOT	Michigan Department of Transport
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PMS	Pavement Management System
PCC	Portland Cement Concrete
PSD	Power Spectral Density
PSI	Present Serviceability Index
PSR	Present Serviceability Rating
PRI	Profile Roughness Index
QCM	Quarter Car Model
QCS	Quarter Car Simulation
RARS	Reference Average Rectified Slope
RRRS80	Reference Average Rectified Slope a 80 KPH
RTRRMS	Response Type Road Roughness Measuring System
RN	Ride Number
RSP	Road Surface Profiler
RMS	Root Mean Square
RMSD	Root Mean Square Deviation
RMSVA	Root Mean Square of Vertical Acceleration
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SIMAP	Sistema de Administración de Pavimentos
SDDOT	Sour Dakota Department of Transport
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavements
SNRA	Swedish National Road Administration
TDPA	Tránsito Diario Promedio Anual
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
TBI	Truck Boom Integrator
UMTRI	University of Michigan Transportation Research Institute
VOCMEX	Vehicle Operating Cost México

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfiles en una sección de pavimento. 12
Figura 2. Esquema del Perfilómetro de Inercia del GMR. 13
Figura 3. Vista lateral de un perfilómetro con ruedas seguidoras. 14
Figura 4. Movimiento de Pasajeros y Carga en México 2004. 23
Figura 5. Variaciones de las cargas dinámicas a lo largo de un pavimento. 29
Figura 6. Variación de las cargas dinámicas con el PSI. 29
Figura 7. Relación entre el IRI y las cargas dinámicas de un camión. 30
Figura 8. Secciones similares a lo largo de un proyecto de pavimento carretero. 30
Figura 9. Efectos del coeficiente a1 en la relación entre el tiempo y la rugosidad futura. 31
Figura 10. Efecto de la condición del pavimento en la falla de los amortiguadores de un vehículo. 34
Figura 11. Rugosimetro del Departamento Público de Carreteras (BPR). 37
Figura 12. Ilustración del algoritmo de cómputo usado para calcular el IRI. 39
Figura 13. Respuesta del filtro del IRI. 39
Figura 14. Escala de rugosidad en base al IRI. 41
Figura 15. Sensibilidad del IP a una sinusoide inclinada. 47
Figura 16. Ejemplo de un trazo perfilado. 50
Figura 17. Ejemplos de la posición de la banda de borrado cuando se mueve entre dos secciones de perfil. 51
Figura 18. Ejemplo que muestra el método de determinación del IP a partir del trazo de un perfilógrafo. 52
Figura 19. Rugosimetro del BPR. 55
Figura 20. Rugosimetro del BPR. 55
Figura 21. Medidor Mays acoplado a un carro. 56
Figura 22. Esquema de los componentes del medidor Mays. 57
Figura 23. Cálculo de la profundidad de rodada a partir de un sistema de perfilamiento de tres sensores. 61
Figura 24. Dynatest Road Surface Profiler. 61
Figura 25. Perfilómetro láser ICC. 62
Figura 26. Perilómetro láser RST. 63
Figura 27. Perfilómetro K. J. Law DNC 690. 64
Figura 28. Perfilómetro K. J. Law T6600. 64
Figura 29. Perfilómetro Pathway. 65
Figura 30. Perfilómetro láser SDP Roadware. 65
Figura 31. Sistema electrónico para analizar los resultados de un perfilógrafo. 66
Figura 32. Perfilógrafo de California de estructura armada. 67
Figura 33. Vista superior del perfilógrafo de California. 68
Figura 34. Reporte generado por el perfilógrafo California. 68
Figura 35. Perfilógrafo Ames. 69
Figura 36. Perfilógrafo Rainhart. 70

Figura 37. Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA). 71
Figura 38. Perfilómetro ligero configurado con pista individual. 72
Figura 39. Perfilómetro con sistema de pista doble. 72
Figura 40. Perfilómetro ligero KJL 6400. 73
Figura 41. Método de estadal y nivel. 74
Figura 42. Dipstick. 74
Figura 43. Walking Profiler. 75
Figura 44. Gráfica para lectura visual. Puede ser digital para manejarla en computadora 80
Figura 45. Vista del tramo evaluado de la autopista Morelia-Salamanca. 83
Figura 46. Resultados del Índice de Perfil con Null Band de 0.00, 5.08 y 10.00 mm en un tramo de 100 m de la autopista Morelia-Salamanca. 84
Figura 47. Perfilograma con Null Band de 0, 5.08 y 10 mm en un tramo de 100 m de la autopista Morelia-Salamanca. 85
Figura 48. Vista del tramo evaluado de la carretera a Teremendo, Mich. 87
Figura 49. Resultados del Índice de Perfil con Null Band de 0.00, 5.08 y 10.00 mm en un tramo de 300 m de la carretera a Teremendo, Mich. 87
Figura 50. Perfilograma con Null Band de 0, 5.08 y 10 mm en un tramo de 100 m de la carretera Morelia-Quiroga-EC Teremendo. 88
Figura 51. Gráfica y ecuación de correlación IP-IRI. 93
Figura 52. Factores del costo de operación base de un vehículo ligero, relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con el tipo de topografía del terreno. 95
Figura 53. Factores del costo de operación base de un camión articulado (T3-S3), relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con el tipo de topografía del terreno 96
Figura 54. Vista de la autopista Morelia-Salamanca en dirección a la Ciudad de Morelia. 97
Figura 55. Vista de la carretera México-Toluca en dirección a la Ciudad de México. 101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Red de cuota evaluada con equipo láser en la SCT. 25
Tabla 2. Especificaciones de Índice de Perfil para efectos de pago de pavimentos asfálticos de algunas Agencias Estatales de Carreteras de los Estados Unidos. 78
Tabla 3. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil, para las Normas: N.CTR.CAR.1.04.006.04, N.CTR.CAR.1.04.007.04 y N.CTR.CAR.1.04.009.04. 79
Tabla 4. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil, para la Norma N.CSV.CAR.3.02.005.04. 80
Tabla 5. Resultados de IP en los recorridos 1 y 2 del tramo 1. 82
Tabla 6. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil. 97
Tabla 7. TDPA para la autopista Morelia-Salamanca. 98
Tabla 8. Factores del Costo de Operación Base para la autopista Morelia-Salamanca. 98
Tabla 9. Costos de Operación Base para la autopista Morelia-Salamanca. 99
Tabla 10. COA para la autopista Morelia-Salamanca. 99
Tabla 11. COA totales para la autopista Morelia-Salamanca. 100
Tabla 12. Factores de Estímulo o Sanción según el IP, para la Norma N.CSV.CAR.3.02.005.04, Carpeta Asfáltica de Granulometría Densa. 101
Tabla 13. TDPA para la carretera México-Toluca. 102
Tabla 14. Factores del Costo de Operación Base para la carretera México-Toluca. 102
Tabla 15. Costos de Operación Base para la carretera México-Toluca. 103
Tabla 16. COA para la carretera México-Toluca. 103
Tabla 17. COA totales para la Carretera México-Toluca. 103

CAPÍTULO 1
ANTEDECENTES

Los perfiles y los perfilómetros

Un perfil es la vista en dos dimensiones de un segmento de la superficie del camino, tomada a lo largo de una línea imaginaria. Los perfiles tomados a lo largo de una línea lateral muestran la elevación de la corona de diseño del camino, además de las roderas y otros daños. Los perfiles longitudinales muestran el grado de la rugosidad o uniformidad, tal como se observan en la Figura 1.

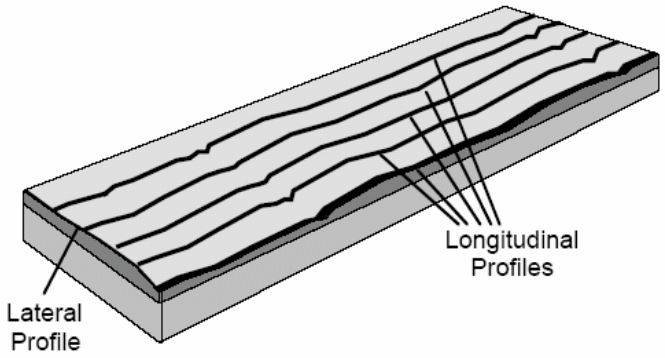


Figura 1. Perfiles en una sección de pavimento.

El perfil de un camino, pavimento o del suelo puede medirse a lo largo de cualquier línea continua imaginaria en la superficie. Si las mediciones son repetitivas y se sigue la misma línea imaginaria puede esperarse un mismo perfil. Es posible también medir el perfil en una línea curva. Normalmente, se espera que para un camino la línea se ubique a una distancia constante de la línea central o de alguna otra referencia geométrica del camino. Frecuentemente, el perfil es medido a lo largo de dos líneas por carril, uno en cada rodada. Para mayor detalle cualquier número de líneas pueden ser medidas.

En cualquier línea del camino, se tiene un perfil real. El concepto es simple: Es fácil visualizar que si se dibuja una línea sobre una superficie física el resultado es un perfil que realmente existe.

Un perfilómetro es un instrumento que es usado para producir una serie de números que se relacionan de una manera bien definida con el perfil real. Los números obtenidos de diversos medidores de perfil no son necesariamente iguales a la elevación real. Un medidor de perfil o perfilómetro mide los componentes del perfil real que son necesarios para un propósito específico. Trabajan combinando tres aspectos:

1. Una elevación de referencia.
2. Una altura relativa para la referencia.
3. Una distancia longitudinal.

Casi todos los perfilómetros de alta velocidad usados en los Estados Unidos están basados en el diseño original del perfilómetro de tipo inercia desarrollado por Spangler y Kelly en los laboratorios de la General Motors Research (GMR). La Figura 2 muestra una vista simplificada de los tres aspectos señalados anteriormente que toma en cuenta el perfilómetro de tipo inercia de la GMR.

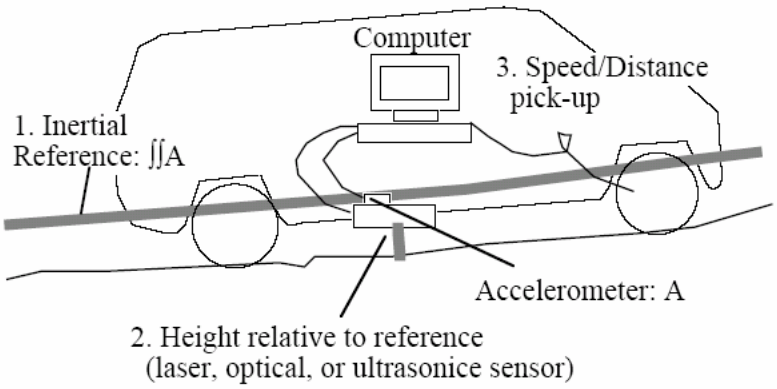


Figura 2. Esquema del Perfilómetro de Inercia del GMR.

La referencia de inercia es proporcionada por un acelerómetro (un sensor que mide la aceleración) que es orientada verticalmente. Los algoritmos de procesamiento de datos convierten la medición de aceleración vertical a una referencia de inercia que define una altura instantánea del acelerómetro en el vehículo.

La altura relativa del suelo hacia la referencia es por lo tanto la distancia entre el acelerómetro (en el vehículo) y el nivel del suelo que se encuentra directamente bajo el acelerómetro. Esta altura es medida con un sensor que no esta en contacto con el piso, tal como son los transductores ultrasónicos o los láser. La distancia longitudinal para los instrumentos es tomada generalmente del velocímetro del vehículo.

El Sour Dakota Department of Transport (SDDOT) en los Estados Unidos diseño y construyó un novedoso sistema de medición de perfiles del tipo GMR en 1981.[1] El SDDOT, facilitó los planos para que el sistema fuera desarrollado en otros estados y ofreció asesoría sobre los costos nominales a los estados que desearan construir sistemas similares. Diversos estados y fabricantes comerciales han construido sus sistemas basados en el diseño original del SDDOT. Actualmente es más común que se usen en los Estados Unidos los sistemas de medición de perfiles.

El perfilómetro original tipo GMR utilizó un seguidor mecánico de ruedas con un resorte de carga contra la superficie. Un problema común con el seguidor mecánico de ruedas era que en algunas ocasiones se salía cuando pasaba por un bache o un hoyo. El

resultado era que los trazos del perfil por la trayectoria de la rueda eran dibujados en el aire y no en la superficie. Un ejemplo de este equipo se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Vista lateral de un perfilómetro con ruedas seguidoras.

El diseño del seguidor de ruedas usado en los perfilómetros del tipo de la GMR vio limitado su rango de medición, excluyendo ciertos caminos rugosos y su velocidad fue impuesta a ciertos límites de operación en los caminos muy poco rugosos.

El problema más serio, en este tipo de equipos, radicaba en que el seguidor mecánico se daña muy fácilmente. En los perfilómetros modernos del tipo de la GMR, los seguidores de rueda han sido remplazados por sensores sin contacto superficial que miden la altura usando ultrasonido, vigas láser o imágenes ópticas.

La altura se puede medir usando ultrasonido de las siguientes dos maneras:

1. Una bocina emite una corta descarga de sonido y el tiempo que necesita el sonido para llegar al pavimento y regresar es medido por un micrófono. Conociendo la velocidad del sonido a través del aire puede calcularse la distancia en el intervalo de tiempo.

2. La bocina emite un tono continuo y el sonido reflejado es monitoreado. La altura se determina por la fase entre la relación original y el sonido reflejado.

El funcionamiento de un perfilómetro de tipo inercia se basa en el movimiento. Este tipo de instrumentos no sólo trabaja a la velocidad de operación de las carreteras, si no que requiere cierta velocidad para operar apropiadamente. Por ejemplo, aún el mejor de los perfilómetros de tipo inercia no funciona bien a velocidades menores de 20 KPH.

La referencia de inercia tomada de un perfilómetro se califica como útil, pero no es fácil de visualizar como la referencia que es usada en los sistemas de tipo estático como el de estadal y nivel o con el de nivel pivotante denominado Dipstick, que se vera en capítulos posteriores. El acuerdo al que se ha llegado entre un perfil obtenido con un sistema del tipo inercia y el que se deriva de uno estático, es bueno para ciertos aspectos.

Las mediciones estáticas incluyen el grado del camino y las mediciones de un medidor de perfil del tipo inercia no. La longitud de las ondulaciones, cubriendo centenares de metros, está incluida en las mediciones estáticas, pero no se definen en los medidores de perfil del tipo inercia.

Debido a estas diferencias, las gráficas de elevación-distancia obtenidas de un perfilómetro del tipo inercia no coinciden con las gráficas obtenidas de los datos medidos estáticamente, no obstante que las mediciones son realizadas sobre la misma línea y se basan en el mismo perfil real.

Además, diferentes gráficas podrán obtenerse por la medición repetitiva de un mismo perfil real, si las mediciones son realizadas con diferentes manufacturas de los perfilómetros de tipo inercial. Incluso se pueden obtener diferentes gráficas con el mismo instrumento, si se hacen pequeñas variaciones en los ajustes del equipo.

Los análisis descritos son un intento de obtener la misma información de las mediciones hechas con un perfilómetro de tipo inercia que de la adquirida de un perfil real. Los filtros tales como el promedio de movimiento son usados en los procesos de medición para hacer una comparación más a detalle de la capacidad que tienen los diferentes dispositivos para medir de los perfiles las características que son de interés.

El perfil real incluye una gran variedad de información. Nos dice de alguna manera si el camino asciende o baja por una colina. Da información de la rugosidad. Tiene información de la textura. No es económico ni útil hacer una medición detallada del perfil real para extraer información de la textura ni tampoco tener una visión grande de las características del paisaje tales como colinas y valles.

La cantidad de datos almacenados que se requería para capturar un kilómetro de perfil con detalle bajo el enfoque de la textura saturaría rápidamente la capacidad de almacenaje de las computadoras y haría que la administración de los datos fuera dificultosa. Los perfilómetros se diseñan solo para tomar en cuenta una parte de la información del perfil real.

Un perfilómetro valido proporciona las medidas que, cuando son analizadas, dan los mismos resultados que se obtendrían al analizar el perfil real. Asimismo, la validez de un medidor de perfil dependerá del uso que se hará de los datos. Aunque los perfilómetros no evalúan toda la información que se requiere para un perfil real, miden la información que se considera de interés.

Un perfilómetro es considerado valido para obtener las propiedades de un perfil si las estadísticas obtenidas de las mediciones no son altas ni bajas en el promedio, comparadas con las estadísticas que se calcularon del perfil real.

Las estadísticas provenientes de dos o más perfilómetros validos pueden ser directamente comparadas, sin la conversión requerida. Porque las estadísticas calculadas de los resultados arrojados de un perfilómetro aceptado no se basan en la relatividad del perfil real, no es necesario efectuar una conversión estadística de los

datos de un perfilómetro valido para compararlos con los datos obtenidos de diferentes perfilómetros aceptados.

Las estadísticas obtenidas de estos dispositivos son estables a través del tiempo. Porque el concepto de un perfil real es relativamente corto, las estadísticas calculadas de un perfil en el año tienen el mismo significado que las calculadas el año pasado y pueden ser comparadas con las estadísticas calculadas después de 100 años.

Si las estadísticas calculadas de un dispositivo que traza perfiles se basan en una sistematización relativa que es aceptada como referencia, que se dice tiende a ser un 20% más alta para algunas pruebas. Entonces, simplemente el dispositivo no califica para ser aceptado como un perfilómetro para los análisis.

No es aconsejable aplicar un factor de escala para corregir el error del 20%, porque el origen del error depende probablemente de factores desconocidos. (Mejor conocido como de fabricación). Un medidor de perfil no es valido para registrar adecuadamente las propiedades de un perfil real si:

1. Si las mediciones se acomodan sistemáticamente.
2. El error aleatorio para una medición individual es inaceptablemente alto.

Métodos manuales

El método más obvio para la medición de los perfiles de la superficie es el que emplea un topógrafo con un estadal y nivel. Aunque es laborioso, la medición de un perfil con este método es directa y no contiene ninguna fuente probable de error. La exactitud de las mediciones es determinada básicamente por la precisión del instrumento de nivelación (junto con la habilidad del equipo de medición) y de los intervalos entre mediciones. El equipo típico de medición se usa para lecturas de 3 mm, lo cual es muy amplio aún para la mayoría de los pavimentos rugosos.

En algunos casos, las mediciones con estadal y nivel se usan en sitios de un camino para calibrar los instrumentos que miden la rugosidad. Para esta aplicación, el nivel debe tener una precisión de 1 mm. Esta precisión es adecuada para la medición del IRI en todos los pavimentos aún en los más lisos. En superficies de camino muy lisas, se necesita una precisión de 0.5 mm.

El intervalo de muestra recomendado originalmente para calcular el valor correcto de IRI es de 500 mm si en el camino no se encuentra una característica significativa de rugosidad (manchas de mezcla asfáltica, baches, etc.), lo cual no puede ser plasmado en el intervalo. Un espaciamiento más cerrado de 250 mm es recomendable normalmente. Un análisis posterior de requisitos para obtener estimaciones exactas del IRI, indica que el espaciamiento debe ser de 305 mm o menor.

La especificación de precisión y del intervalo de muestra es común para las mediciones con estadal y nivel. Lo que no es común es el proceso real de medición. Este método es tedioso y consume mucho tiempo, toma varios días medir ambas rodadas en un tramo

de camino. El tiempo requerido para hacer la medición es aproximadamente proporcional al número de muestras por kilómetro, esto da una fuerte motivación para usar el mejor intervalo que nos de un perfil útil.

Después que las mediciones se efectúan en el campo, se deben capturar en un sistema de cómputo. El principal problema con el método de estadal y nivel es que requiere de un registro manual de una gran cantidad de datos y por lo tanto se tiene una gran ocasión para que se presenten errores humanos.

Por lo menos, otros dos métodos estáticos de medición de perfiles están en uso, basados en sistemas comerciales su diseño ofrece una gran eficiencia y la eliminación del registro manual de las medidas. Uno de estos es el dispositivo desarrollado por la unidad externa del Transport and Road Research Laboratory (TRRL) en Inglaterra, llamada la viga TRRL. Consiste en una viga de caja de aluminio de 3 m de longitud que es apoyada en cada extremo por un trípode fijo.

La viga es nivelada por el ajuste en un extremo, de tal modo que se define un dato horizontal fijo. La medición de la distancia de la superficie a la viga es hecha con un instrumento ensamblado que contacta la superficie a través de un pequeño neumático que se desliza a lo largo de la viga en unos rodillos de precisión.

El ensamble móvil contiene un microprocesador que digitaliza la señal de los intervalos preestablecidos y graba los datos. Después que el accesorio se desliza y mueve sobre la longitud de la viga, se levanta y se baja al camino en su nueva posición de inicio que se empareja ala vieja posición final. La viga del TRRL fue diseñada para ser usada en países en desarrollo y para calibrar otros sistemas de medición de la rugosidad.

Potencialmente, este diseño introduce un pequeño error aleatorio cada que la viga es movida. Se demostró que este error es insignificante cuando un prototipo fue usado en el experimento en Brasil en 1982. En este experimento, la viga demostró tener un nivel de exactitud difícil de igualar.

Una propuesta diferente se utiliza para un dispositivo llamado Varilla Nivelante (Dipstick) hecho por la compañía FACE. Este dispositivo esta apoyado por dos patas separadas nominalmente por una distancia de 0.3 m y sostenido con la mano verticalmente por el operador a través de la manija que se encuentra en el extremo vertical de la varilla. La separación entre patas puede ajustarse en su longitud en algunos modelos. El instrumento mide el grado de inclinación entre los apoyos de tal modo que proporciona la diferencia de elevaciones.

El instrumento graba la diferencia en elevación y se la señala al operador, quién toma el dispositivo a lo largo del camino pivoteando alternadamente sobre cada pata. Este instrumento es usado comúnmente en los Estados Unidos para validar las medidas obtenidas de perfilómetros de tipo inercia. El Dipstick ha sido comparado con éxito al estadal y nivel como dispositivo de referencia para obtener el IRI.[2]

Análisis de perfiles

Un estudio global de índices y análisis de perfiles fue hecho en 1982 en el International Road Roughness Experiment (IRRE), que se describe en el documento técnico Nº 45 del Banco Mundial.[3] Los datos obtenidos del experimento fueron usados para comparar una variedad de análisis de perfiles basados en la rugosidad usados en aquel tiempo.

Los análisis incluyeron la Power Spectral Density (PSD), Internacional Roughness Index (IRI), Brasilian Quarter Index (QI), Half Car Simulation (HCS), Root Mean Square of Vertical Aceleration (RMSVA), Root Mean Square Desviation (RMSD) que fue propuesto por el TRRL Británico y diversos índices de bandas de onda usados en Europa.

Los grados subjetivos del grupo fueron obtenidos y correlacionados con el IRI. El producto significativo del proyecto fue la estandarización de los índices y de los métodos para su medición. Dos conceptos definidos en este trabajo y que ahora son empleados extensamente son:

1. El IRI.
2. La tipificación en clases de los métodos de medición de la rugosidad:

    - Perfil de Clase 1.
    - Perfil de Clase 2.
    - Sistemas de Clase 3 de Calibración de Tipo respuesta.
    - Sistemas de Clase 4 de estimación subjetiva.

Estos conceptos se describen en el documento técnico Nº 46 del banco Mundial.[4]

En los primeros cinco años de la década de los noventas, se dio un fuerte movimiento en los Estados Unidos y en otras partes para usar el IRI. Este valor es requerido en todos los datos que son sometidos en las bases de datos de los Highway Performance Monitoring System (HPMS) de la Federal Highway Administration (FHWA) y de otros países.

Todos los sistemas que virtualmente definen los perfiles del camino, usados en los Estados Unidos, están equipados con un software para calcular el IRI. El apéndice J del Manual de Campo “Equipo de Rugosidad, Calibración y Recopilación de Datos” de los HPMS hace referencia al documento técnico Nº 46 del Banco Mundial, respecto a los procedimientos para hacer la medición directa de los perfiles y el cálculo del IRI.[5]

El Manual de Campo del HPMS recomienda que el perfil de la rodada derecha se use para calcular el IRI que se utilice en la base de datos del HPMS. El manual también sugería que los esfuerzos del HPMS sean coordinados con otras actividades que tengan relación, tal como el estudio de Long Term Performance Pavement (LTPP) y en el de los Sistemas Estatales de Administración del Pavimento.

El otro índice del perfil que ha generado interés recientemente en los Estados Unidos es el Road Number (RN) propuesto por Janoff.[6] Se basa en correlaciones experimentales resueltas entre las funciones del perfil obtenido de la PSD y los índices subjetivos de la habilidad del viaje. La experiencia con el RN no es todavía tan extensa como con el IRI.

Aunque se han propuesto muchos índices del perfil y el estudio se ha extendido por más de 20 años, todos se basan en los algoritmos matemáticos que fueron propuestos para caracterizar la medición del perfil en los setentas. Estos algoritmos son usados para procesar el perfil y clasificarlo en alguna de las categorías definidas. El proceso implica esencialmente dos pasos:

1. Transformación del perfil original.
2. Resumen promedio del perfil transformado.

Los cambios típicos de una transformación consisten en eliminar longitudes de onda largas y un cambio significativo de las longitudes de onda en el perfil. Algunas de las transformaciones que más comúnmente se usan son la simulación del cuarto de carro (por ejemplo el IRI), otras simulaciones de vehículos (por ejemplo las cargas dinámicas en los carros), diferencia finita (cálculo aproximado de la pendiente), desviación media corta (caracterizada por la RMSVA), promedio móvil de uniformidad (filtro de paso bajo), promedio móvil de remoción (filtro de paso alto), medición de la banda de onda de la Root Mean Square (RMS) y el RN.

Las estadísticas obtenidas de los perfiles filtrados se resumen típicamente usando:

1. RMS.
2. Promedio Rectificado de Valores (la medición acumulada de respuesta fue dividida entre la longitud del perfil).

Una transformada de Fourier cambia el perfil que esta en función de la distancia a una función del número de onda. Este tipo de transformación es comúnmente llamada Análisis Espectral. Una forma típica de la transformada de Fourier es la función de la PSD.

Relaciones experimentales para la interpretación de los índices

Los análisis que se derivaron de las correlaciones experimentales entre las propiedades del perfil y las mediciones de su funcionamiento, requiere que los datos sean obtenidos de cerca. Los principales campos de investigación del funcionamiento del pavimento incluyen la calidad de viaje del vehículo y las cargas dinámicas impuestas por los vehículos pesados. Debido a que el funcionamiento del pavimento se puede clasificar en funcional y estructural, por lo tanto existe una relación entre la *calidad del viaje, el funcionamiento del pavimento y las cargas dinámicas*.

Calidad de viaje

Se han efectuado diversos estudios que relacionan la rugosidad del camino con las mediciones experimentales de la calidad del viaje. Probablemente los trabajos más

significativos que relacionan los nuevos datos experimentales y que han llevado a una fuerte correlación entre la calidad del viaje y la rugosidad de un perfil son los estudios de Janoff elaborados para la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), descritos en los reportes 275 y 308.

Estos reportes ligan las características del perfil a los grados subjetivos del indicador de la capacidad del viaje. Janoff recomienda procesar los perfiles del camino para obtener un RN, usando un análisis espectral y una función de peso que enfatiza las longitudes de onda en el rango de 1.6 a 8 ft (0.49 a 2.44 m). En otro de sus estudios Janoff encontró que las correlación entre el RN y el IRI era buena en los pavimentos flexibles y muy baja para los rígidos.

Durante los estudios de la NCHRP de la rugosidad del pavimento y de la capacidad del viaje, fueron considerados inicialmente el vehículo de pasajeros y la calidad de viaje de los camiones. Se determinó en ese entonces que el vehículo de pasajeros y la calidad de viaje del auto debían ser lo que primero se considerará.

Las carreteras que tienen un alto nivel de tráfico y por las que circulan la mayoría de los camiones con altas velocidades generalmente no se permite que desarrollen cierto nivel de rugosidad en el pavimento, debido a que llevaría a quejas sustanciales de la calidad de viaje de los camiones. Un ejemplo son las juntas de los pavimentos de Concreto de Cemento Pórtland con una crítica común significativa.

La calidad de viaje es de gran interés para los constructores de carros, camiones y autobuses. En el campo de la dinámica de los vehículos, no se tiene presente como la calidad de viaje es percibida por el conductor o el pasajero y como puede predecirse de mediciones experimentales de vehículos en movimiento. La relación entre las aceleraciones del cuerpo humano y la evaluación humana en el viaje de un vehículo o la capacidad de viaje en el pavimento aún no son entendidas. Sin embargo, el efecto básico de primer orden es muy simple: variaciones altas en los niveles de vibración generalmente resultan en una mala opinión del viaje.

Aunque la relación entre las vibraciones en el ambiente de un ser humano y su opinión acerca de ese ambiente no es simple, la relación entre el perfil del camino y las vibraciones en ese ambiente son fácilmente entendibles mediante modelaciones simples de vehículos dinámicos. Las vibraciones en un coche de pasajeros son previstas bien en primera instancia con los modelos de un cuarto de carro y las vibraciones de los camiones son predecidas con los modelos de proyección plana, conocidos como de bicicleta, si se incluyen los componentes esenciales.

Cargas dinámicas en el pavimento.

Las cargas dinámicas en un pavimento causadas por la rugosidad del camino han sido medidas experimentalmente por Sweatman y Ervin.[7,8,9] En cada uno de estos estudios, la rugosidad del camino fue relacionada a un Dinamyc Load Coeficient (DLC) de las cargas de las llantas de los camiones para diversos diseños de suspensión.

Otro estudio de las cargas dinámicas en el pavimento causadas por la rugosidad del camino, se encuentra dentro del reporte 353 de la NCHRP.[10] En este trabajo, las mediciones experimentales de las cargas de los neumáticos del camión se utilizaron para validar la simulación de un vehículo en una proyección plana y medir los esfuerzos en el pavimento causados por las cargas dinámicas que se usaron para autorizar el modelo estructural del pavimento ILLI-SLAB.

El estudio se enfoco a relacionar las cargas dinámicas (usando la caracterización del DLC) con la rugosidad del camino y con la aplicación de modelos de simulación del vehículo. El estudio también demostró la capacidad de los modelos de proyección plana de duplicar el comportamiento de las cargas dinámicas en el rango de frecuencias de 0 a 15 Hz.

Comportamiento funcional del pavimento

El comportamiento de un pavimento es comúnmente descrito como funcional o estructural. La definición aceptada del comportamiento funcional fue desarrollada en la prueba del camino de la American Association of State Highway Officials (AASHO), terminada en 1960.[11]

"El nivel particular de la capacidad de un pavimento para servir al público que viaja ha sido definido como nivel de servicio, y es este nivel de servicio en el tiempo, junto a las aplicaciones de carga definen el comportamiento del pavimento"

El Present Serviceability Rating (PSR) fue descrito como la percepción subjetiva del público del nivel de servicio de un pavimento; el Present Serviceability Index (PSI) fue estimado del cálculo del PSR de mediciones objetivas.[12] Fue obtenido en la prueba del camino donde la rugosidad del pavimento era el factor más importante en la determinación del PSI de un pavimento. El concepto de PSI se baso principalmente en mediciones de la rugosidad y ha sido usado por muchas agencias estatales de carreteras en:

1. Supervisar la condición y comportamiento del pavimento.
2. Determinar la necesidad de mantenimiento y rehabilitación.
3. Predecir la vida remanente.

Con el desarrollo e implementación en años recientes de los sistemas de administración de pavimentos se ha dado una elaboración más formal de expedientes, evaluaciones y pronósticos de las condiciones del pavimento. Ha sido evidente que la destreza de recolectar y analizar los perfiles longitudinales de las rodadas del pavimento proporciona mejores métodos para definir su condición y nivel de servicio.

Consecuentemente, la habilidad de medir lo más real los perfiles del pavimento y calcular varios recorridos y estadísticas de la rugosidad, son elementos cada vez más importantes en la determinación del comportamiento funcional de los pavimentos de las carreteras.

Como se describió anteriormente, la FHWA requiere que todos los datos de rugosidad usados en la base de datos del HPMS estén definidos en términos del IRI. Sin embargo, no existe todavía un valor estándar de cómo se puede representar el nivel de servicio de un pavimento en la base de datos de los sistemas de administración de pavimentos de cada uno de los estados.

Muchos estados que evalúan su red de carreteras obtienen valores de IRI, aún no definen cuál será la base para definir el índice de servicio que tomarán en su base de datos. Algunos han hecho una correlación de las unidades de IRI a PSI, otros han correlacionado el IRI con mediciones anteriores de la rugosidad, tales como los sistemas tipo respuesta, Mays Meter, o variación de la pendiente y varios usan el IRI directamente.

Comportamiento estructural de los pavimentos

El comportamiento estructural de los pavimentos se describe como la capacidad de soportar las cargas de los neumáticos de los vehículos actuales y anticipadas con un mantenimiento, actividades de rehabilitación y gastos realistas. Algunos intentos se han hecho, de forma inadecuada, para definir una capacidad estructural y comportamiento en base a los análisis de los perfiles longitudinales del pavimento.

De cualquier manera, en las carreteras con tráfico pesado en la que se tiene un elevado porcentaje de camiones, el desarrollo de la rugosidad del pavimento relacionado con el comportamiento estructural ocurre a la vez más allá del grado optimo que se tiene en la planeación y programación de la rehabilitación estructural.

Muchos países usan documentos desarrollados de los deterioros de la superficie del pavimento y pruebas no destructivas para probar su método preferido de evaluación del comportamiento estructural. (Para cuando un pavimento esta rugoso, éste se encuentra lejos del punto optimo para su mantenimiento).

Novak y Defrain del Michigan Departament of de Transport (MDOT) desarrollaron algunos estudios relacionados con la variación en los perfiles de acuerdo a la temporada del año.[13] Encontraron que las grietas en las sobrecarpetas cambian significativamente cuando ocurre la acción de las heladas. Esto generalmente incrementa la rugosidad, y una vez que ocurre, seguirá aumentando. Puede ser que las variaciones estaciónales en el perfil puedan correlacionarse más directamente con los deterioros que con los perfiles mismos.

Los investigadores han demostrado que este tipo de interacciones rugosidad-deterioros ocurren en un patrón cíclico. Así, el análisis espectral puede ser usado para identificar la presencia de este tipo de patrones, el cual se puede relacionar con ciertas características del comportamiento.

En México

En todos los países, como en el nuestro, el transporte por carretera es el de mayor uso en las actividades comerciales, sociales e industriales, por tal razón se requiere que este sistema opere con eficiencia. Se sabe que por la red carretera de la República Mexicana circula el 80% de las cargas que se mueven en el territorio y que el movimiento de pasajeros representa el 98%, como se aprecia en la Figura 4, donde se muestran las estadísticas nacionales del 2004, de acuerdo a datos obtenidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

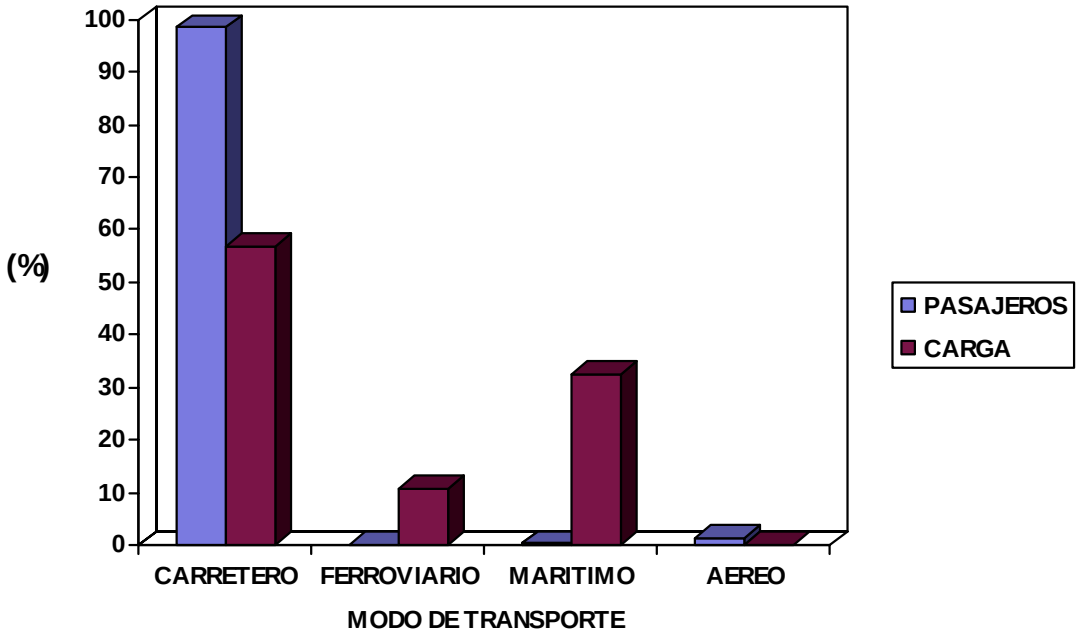


Figura 4. Movimiento de Pasajeros y Carga en México 2004.

Actualmente en el mundo se llevan a cabo diversos estudios, análisis e investigaciones destinados a mejorar la calidad que se fija en los proyectos carreteros o hacer que se cumplan adecuadamente estos trabajos. Esto ha permitido, que en el caso particular de la construcción de carreteras la vida útil para las que fueron diseñadas se cumpla adecuadamente y que el dinero destinado para su conservación se emplee cuando sea requerido y no a los pocos meses de terminados los trabajos.

Una de las maneras de lograr una buena calidad de los trabajos en carreteras, como ya se ha señalado en párrafos anteriores, es usar los equipos de auscultación que miden su estado superficial, como los que definen el IRI, que se pueden clasificar en nuestro país de acuerdo a la velocidad de operación en dos tipos: de bajo y alto rendimiento.

El campo de aplicación de unos y otros depende de varios factores, entre los cuales se pueden contar las afectaciones al tráfico durante la medición y la seguridad de los operadores; por ello, cada vez es más habitual el empleo de equipos de alto rendimiento en tareas de auscultación sistemática de la red.

Por otra parte, las mediciones destinadas al control de calidad en obra suelen llevarse a cabo con equipos de bajo rendimiento, que si bien circulan a velocidades mucho más bajas, o incluso son equipos manuales, al tratarse de carreteras no abiertas al tráfico pueden emplearse sin mayores dificultades, tal como el Perfilógrafo de California, aunque este equipo evalúa el Índice de Perfil (IP), dicho valor puede correlacionarse para obtener el IRI.

En nuestro país al final de la década de lo 90's se adquirieron equipos de alto rendimiento del tipo Mays Meter para la evaluación del IRI en la red nacional y Perfilógrafos tipo California para medir la calidad superficial durante la construcción de los pavimentos.

Los datos de IRI obtenidos eran usados en los sistemas de administración de carreteras para encontrar las acciones económicas y técnicas más adecuadas para la rehabilitación de los pavimentos, además de llevar el monitoreo superficial de los caminos para detectar oportunamente aquellos tramos con un incremento significativo de deterioro superficial.

Uno de los sistemas iniciales de administración en nuestro país fue el desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) llamado Sistema de Administración de Pavimentos (SIMAP), en donde los datos de IRI sustituyeron a los valores de calificación subjetiva del camino que se venían utilizando, la cual asignaba calificaciones de 5 para un camino excelente y 0 para un camino intransitable, según la metodología de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), denominado, como ya se señaló, Índice de Servicio Actual.

Actualmente la SCT ya no emplea el SIMAP, ya que en el mercado han aparecido nuevos y más completos sistemas de administración de carreteras como son el SISTER, empleado por la Dirección General de Conservación de Carreteras, hasta final de la década de los 90's, cuando paso a ser sustituido por el HDM-4, sistema desarrollado e implementado por el Banco Mundial.

Por otro lado, la SCT decide normar los datos del Índice de Perfil y controlar la calidad inicial de los pavimentos, por lo que el IMT saca al mercado la normativa para la Construcción de Mezclas Asfálticas en Caliente, Frío y de Concreto Hidráulico (N.CTR.CAR.1.04.006/04, N.CTR.CAR.1.04.006/04 y N.CTR.CAR.1.04.006/04)[14], así como en los trabajos de Conservación Periódica en la Construcción de Carpetas Asfálticas de Granulometría Densa (N.CSV.CAR.3.02.005/04)[14]

Cabe destacar que a la par de la publicación de la normativa señalada, la SCT comienza a solicitar dentro de sus contratos para la construcción de pavimentos, tanto asfálticos como de concreto, el uso del Perfilógrafo de California y su Índice de Perfil, para verificar la uniformidad o regularidad inicial.

La Dirección General de Desarrollo Carretero, dependiente de la SCT, ha encargado desde 1999, la ejecución de los estudios relativos a la Medición de la Rugosidad actual de la Superficie de Rodamiento en Autopistas de Cuota mediante Equipo de Alto Rendimiento (clase 1); incluyendo el cálculo del IRI y la obtención de la profundidad de roderas. Estos trabajos se han realizado en el Sistema Nacional de Autopistas de Cuota, mismo que está formado por las siguientes redes que se muestran en la Tabla **1**.

RED	LONGITUD KM/CARRIL	%
CAPUFE	347.434	1.5
CONCESIONADA	5,864.268	25.6
FARAC	16,655.942	72.8
TOTAL	22,867.644	100

Tabla 1. Red de cuota evaluada con equipo láser en la SCT.

Con los resultados de estos estudios, IRI y Roderas, se dispone de los elementos para elaborar las estrategias de conservación que maximizan la rentabilidad de los recursos destinados para este fin, y por tanto preservar la vida útil del camino procurando un costo mínimo. Asimismo, desde el punto de vista operativo, la determinación del IRI sirve para evaluar la eficiencia de los programas de conservación, al incidir estos en el estado superficial de los pavimentos y este aspecto, a su vez, repercutir en los costos de operación de los vehículos.

CAPÍTULO 2
LA RUGOSIDAD Y UNIFORMIDAD EN EL PAVIMENTO

La rugosidad del camino

Los usuarios del camino juzgan la calidad de un camino principalmente basándose en la calidad del viaje. Desde el punto de vista de algunos usuarios, lo rugoso del camino se traduce en incomodidad, reducción de la velocidad, daños potenciales al vehículo e incremento en los costos de operación vehicular.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) en su Norma Estándar E867 [15] define a la rugosidad como las desviaciones de la superficie de un pavimento a partir de una superficie plana real con dimensiones características que afectan las dinámicas del vehiculo, la calidad del viaje, las cargas dinámicas y el drenaje. La rugosidad del camino también puede definirse como la distorsión de la superficie del camino que transmite inesperadas aceleraciones verticales en el vehiculo, que contribuyen a un indeseable o incomodo viaje.

Existen varios factores que contribuyen a la rugosidad del pavimento: irregularidades provenientes de la construcción, cargas del tráfico, efectos medioambientales y materiales de construcción. Las irregularidades en la construcción pueden ocasionar variaciones del perfil de diseño del pavimento y estas pueden causar que un pavimento que aun no ha sido abierto al trafico presente rugosidad. La rugosidad de un pavimento aumenta con el incremento de las cargas del tráfico. La repetición de las cargas del tráfico puede originar deterioros en el pavimento tales como agrietamientos que resultan en un acrecentamiento de la rugosidad. Los efectos medioambientales tales como heladas y cambios volumétricos debidos a la contracción y expansión del subsuelo pueden también causar que la rugosidad de un pavimento se incremente con el tiempo. La no uniformidad en los materiales que son usados para la construcción de los pavimentos como puede ser una compactación no uniforme de las capas del pavimento y del subsuelo también puede contribuir a la rugosidad.

Opinión del usuario de la calidad del viaje

Estudios de pruebas del camino patrocinados por la AASHO muestran que la evaluación subjetiva del pavimento, basado en el índice medio de evaluación, fue principalmente influenciado por la rugosidad. [12]

Durante las pruebas del camino de la AASHO, grupos de evaluación se usaron para clasificar secciones del pavimento en una escala de 0 a 5. Un índice de 5 indica un

pavimento perfecto, mientras que un índice de 0 representa un pavimento sumamente malo. Un grupo de evaluación consiste de diversos miembros, quienes fueron conducidos sobre varias secciones de pavimento que tenían diferentes niveles de rugosidad. Cada miembro del grupo calificaba los segmentos del camino y el valor medio del grupo de evaluación fue llamado PSR para el segmento de carretera. Después de lo anterior, se desarrollo un análisis de regresión entre los índices medios de evaluación, la rugosidad del pavimento y los deterioros para desarrollar su relación. El objetivo de este análisis fue desarrollar las relaciones que pueden usarse para predecir para predecir el índice de servicio para una sección de pavimento a partir de mediciones objetivas tales como la rugosidad y los deterioros.

La rugosidad en las secciones de pavimento de las pruebas del camino de la AASHO fue medida por un dispositivo llamado el perfilador CHLOE y los valores obtenidos por este equipo fueron usados para calcular un índice de rugosidad llamado "Variación de la Pendiente". La rugosidad de las secciones expresada como la variación de la pendiente fue usada en un análisis de regresión. Relaciones separadas fueron desarrolladas para predecir el índice de servicio para pavimentos rígidos y flexibles. La estimación del PSR obtenido a partir del desarrollo de ecuaciones del PSI. Las siguientes ecuaciones fueron obtenidas en el análisis de regresión para obtener el PSI.

Para Pavimentos Flexibles:

$$PSI = 5.03 - 1.91Log(1+SV) - 1.38RD^2 - 0.01\sqrt{C+P}$$

Para Pavimentos Rígidos:

$$PSI = 5.41 - 1.80Log(1+SV) - 0.09\sqrt{C+P}$$

Donde

PSI: Índice de Servicio Actual
SV: Variación de la Pendiente
RD: Profundidad Media de Rodera en pulgadas
C: Pie lineal de mayor agrietamiento por un área de 1000 pie^2
P: Bacheo en pie^2 por un área de 1000 pie^2

El PSI se basa sobre el concepto de correlacionar la opinión de los usuarios con las mediciones de la rugosidad del camino, agrietamientos, bacheos y roderas. Este análisis índico que alrededor del 95% de la información acerca del servicio de un pavimento es contribuida por la rugosidad del perfil de la superficie.[2] Esto es, los coeficientes de correlación en las ecuaciones de servicio actual mejoran solamente alrededor del 5% cuando otros factores son adicionados.

Beneficios de la uniformidad del pavimento

Los usuarios de las carreteras juzgan la calidad de un camino por su uniformidad (carente de rugosidad). Por lo tanto, las agencias de carreteras se han esforzado lograr la uniformidad del pavimento tanto para tramos rehabilitados como de nueva construcción. Muchas agencias de carreteras piensan que los pavimentos que son construidos con una mayor uniformidad permanecerán uniformes sobre el tiempo y proveerán una mayor vida de servicio. En las últimas décadas, diversas agencias de carreteras han ofrecido incentivos para aquellos constructores que alcancen altos niveles de uniformidad de los valores especificados. En México, estos estímulos aparecieron con la publicación de la normatividad de la SCT que habla acerca del IP. [14]

Los estudios de investigación en años recientes han indicado lo anterior cuando se comparan contra los pavimentos rugosos, que los pavimentos uniformes exhiben las siguientes características:

1. Bajas cargas dinámicas en los pavimentos.
2. Permanece lo uniforme sobre el tiempo.
3. Proporciona una mayor vida de servicio.
4. Decremento en el consumo de combustible y costos de mantenimiento del vehiculo.

Cargas dinámicas en los pavimentos

Los movimientos dinámicos de los vehículos son causados por las irregularidades de la superficie del pavimento. Estos movimientos dinámicos causados por la carga que es aplicada por el vehículo en el pavimento pueden fluctuar por arriba de la carga dinámica del vehículo. La carga aplicada a la superficie del camino por la llanta de un camión será la suma de la carga estática que aplica la llanta y la variación continua de la carga, que puede ser positiva o negativa.

La Figura 5 ilustra las variaciones en la aplicación de la carga a lo largo de la sección de un camino debido a variaciones en la rugosidad.[16] El eje (y) de la Figura 5 representa el E_{dyn}, el cuál se define como:

$$E_{dyn} = \frac{\left(C\,\mathrm{arg}\,a\;Actual\;Aplicada - C\,\mathrm{arg}\,a\;Estática\right)x100}{C\,\mathrm{arg}\,a\;Estática}$$

Está sección del camino tiene un índice de servicio de 2.9. En algunos tramos del camino, la aplicación de la carga es más grande que la carga estática, mientras que en otros es menor.

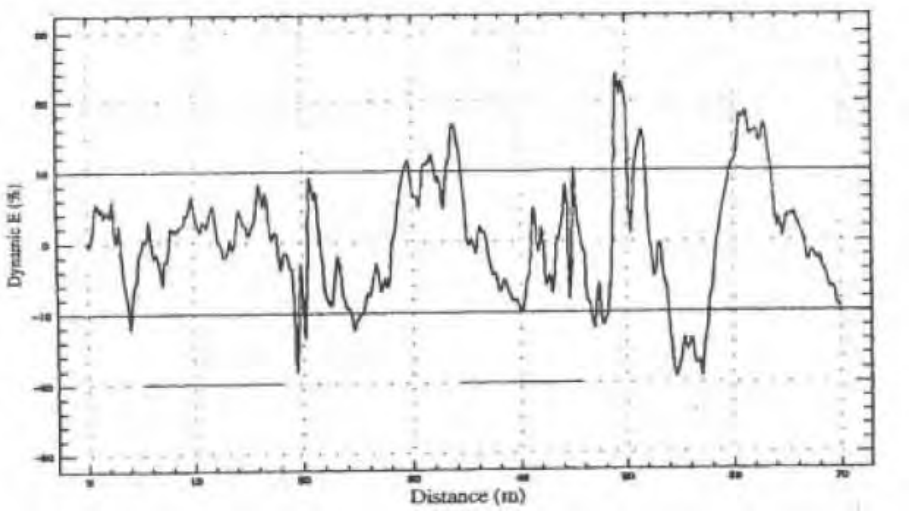


Figura 5. Variaciones de las cargas dinámicas a lo largo de un pavimento.

Ma y Caprez desarrollaron simulaciones de cargas dinámicas en pavimentos con diferentes valores de PSI para determinar los efectos de las cargas dinámicas. Se cuido que las simulaciones de los vehículos se hicieran para diferentes velocidades. La Figura 6 presenta los valores mínimo y máximo de E_{dyn} que se obtuvieron para diferentes secciones de pavimento, de igual forma nos enseña que los efectos de las cargas dinámicas se incrementan con un decrecimiento de los valores del PSI.

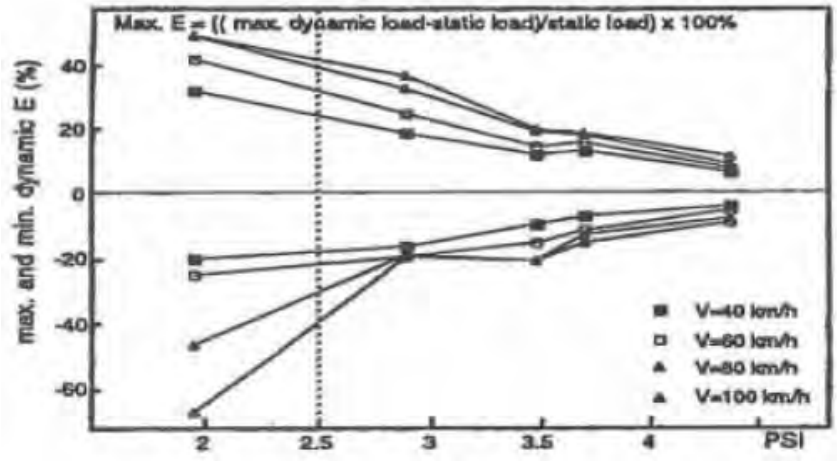


Figura 6. Variación de las cargas dinámicas con el PSI.

La Figura 7 muestra la relación que existe entre la rugosidad y las cargas dinámicas expresadas como un Dynamic Load Index (DLI).[7] Estos resultados fueron obtenidos de un proyecto de investigación en el cuál las cargas dinámicas fueron medidas en camiones con tres diferentes sistemas de suspensión. El DLI se define como la desviación estándar de la carga normalizada por la carga estática. Esto es, un índice de cero implica que la carga es el valor estático, mientras que un índice de 0.25 representa la variación de la carga para la cuál la desviación estándar es el 25% de la carga estática. Los resultados de la Figura 7 muestran que niveles de rugosidad altos causan mayores cargas dinámicas en el pavimento.

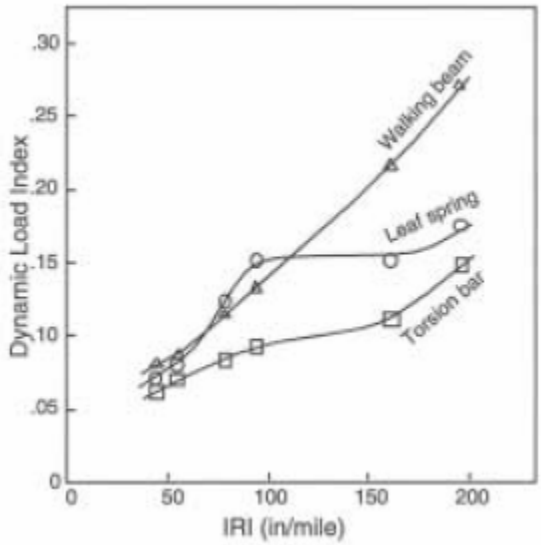


Figura 7. Relación entre el IRI y las cargas dinámicas de un camión.

Los resultados de ambos estudios muestran que la magnitud de las cargas dinámicas inducidas en pavimentos uniformes es sustancialmente menor que las transmitidas en pavimentos rugosos. Un incremento en las cargas dinámicas puede contribuir al deterioro del pavimento. Por lo tanto, un pavimento que tiene un nivel inicial alto de uniformidad se espera que tenga una vida larga de servicio en comparación con la de un pavimento rugoso.

Efectos de la uniformidad inicial en la uniformidad futura

Smith y otros investigadores [17] desarrollaron un estudio para analizar el efecto de la uniformidad inicial del pavimento en su uniformidad futura. Alrededor de 200 proyectos de pavimentos de 10 estados de la unión americana fueron analizados en éste estudio. Cada proyecto fue dividido en dos o más secciones adyacentes “similares” a o largo de la carretera en un esfuerzo para aislar el efecto de la uniformidad inicial del pavimento. Un ejemplo de estas secciones adyacentes similares se ilustra en la Figura 8.

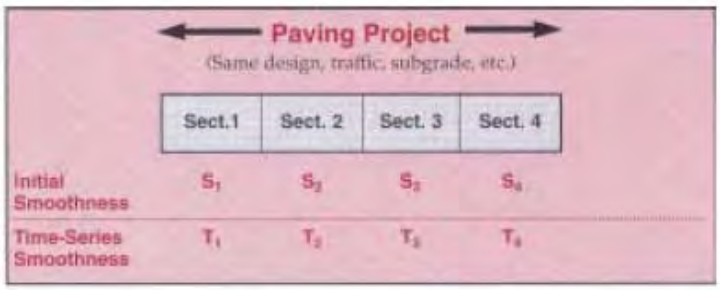


Figura 8. Secciones similares a lo largo de un proyecto de pavimento carretero.

Para cada proyecto se llevo a cabo un análisis de regresión relacionando la uniformidad en cualquier tiempo *t* con la uniformidad inicial y con la duración, expresándose en la siguiente forma general:

$$S_t = a_0 + a_1 S_i + a_2 t$$

Donde

S_t: Uniformidad del pavimento sobre el tiempo *t*
a_0, a_1, a_2: Coeficientes de regresión
S_t: Uniformidad inicial del pavimento
t: Tiempo (duración) en años desde su construcción o sobre el tiempo en que se realizó la prueba de uniformidad.

El análisis determinó los coeficientes de regresión y la información de la significancia estadística de las variables independientes (uniformidad inicial y duración) en la variable dependiente (uniformidad sobre el tiempo *t*). La Figura 9 muestra el significado físico del coeficiente a_1 para cuatro diferentes casos, que se asume para cuatro secciones diferentes proyectos de un pavimento con diferentes valores de uniformidad inicial. Muchos proyectos incluyen en el análisis valores de a_1 que están cercanos a 1, indicando el efecto a largo plazo de la uniformidad inicial.

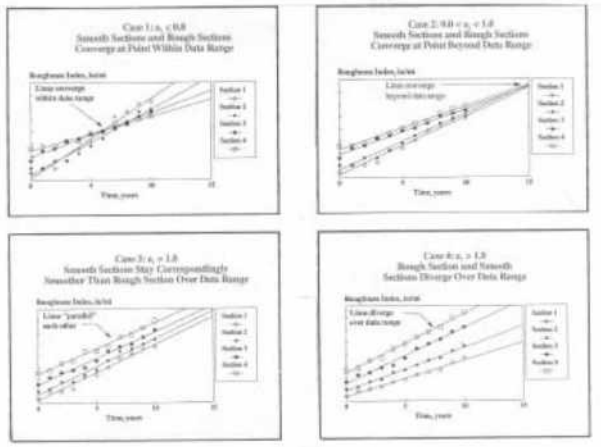


Figura 9. Efectos del coeficiente a1 en la relación entre el tiempo y la rugosidad futura.

Los resultados del análisis de regresión muestran que la uniformidad inicial fue significante en el 80% de los proyectos de pavimentos de Pórtland Cement Concrete (PCC), 80% en proyectos de pavimentos de Asphalt Concrete (AC), 77% de sobrecarpetas de AC de proyectos AC (AC/AC) y 63% de sobrecarpetas de AC de proyectos PCC (AC/PCC). El efecto de la uniformidad inicial en la uniformidad futura fue menor para los proyectos de sobrecarpetas porque el funcionamiento de las sobrecarpetas de AC esta fuertemente influenciado por la condición del pavimento subyacente. Para los pavimentos de AC/PCC, la uniformidad futura esta fuertemente influenciada por el desarrollo de reflexión de agrietamientos. Este factor resulta en la menor significancia para los proyectos de AC/PCC. Si bien la uniformidad inicial tiene

un efecto en la uniformidad futura del pavimento, existen otros factores que tienen influencia en el desarrollo del pavimento que en algunas instancias puede abrumar o negar los efectos de la uniformidad inicial. Tales factores incluyen: variabilidad en los materiales y en la construcción, asentamientos y expansiones del subsuelo, variaciones en la topografía, presencia de puentes, alcantarillas y otras estructuras a lo largo de la carretera.

Un análisis de los datos del camino de prueba de la AASHO hecho por Smith indicó que secciones más uniformes permanecen sobre el tiempo más uniformes, proporcionando que existe una diferencia de más de 0.3 unidades de servicio en la uniformidad inicial. Esto es, los resultados de éste proyecto de investigación mostraron que cuando todas las otras cosas permanecen igual, los pavimentos construidos uniformemente permanecen uniformes durante muchos años.

Efecto de la uniformidad inicial en la vida del pavimento

Las ecuaciones de diseño del pavimento de la AASHO son ampliamente usadas en el diseño de pavimentos rígidos y flexibles. Estas ecuaciones de diseño indican que un pavimento con un alto servicio inicial tendrá una larga vida en comparación con un pavimento que tenga un bajo servicio inicial, cuando todos los demás factores permanecen igual.

La uniformidad inicial de un pavimento es un indicador de la calidad general de la construcción de un pavimento. Si el pavimento se construye con uniformidad, es probable que el contratista haya tenido una buena calidad de ejecución en otros aspectos de la construcción. Una evaluación de los contratistas indicó que la obtención de pavimentos uniformes requiere atención en otros aspectos de la construcción del pavimento de tal manera que se mejore la calidad total del pavimento. Por lo tanto, un pavimento que tiene una uniformidad inicial alta, se espera que proporcione una vida larga de servicio que un pavimento que ha tenido una uniformidad inicial baja, cuando todos los demás factores permanecen igual.

Se han usado dos diferentes técnicas de análisis para investigar el efecto de la uniformidad inicial del pavimento en la vida del pavimento. Las dos técnicas de análisis que se usaron son: proyectos específicos de modelos de regresión y análisis de curvas de falla. Los proyectos específicos de modelos de regresión fueron usados para predecir la vida del pavimento en función de los niveles de rugosidad. El método de la curva de falla fue usado para desarrollar curvas de falla relacionadas al porcentaje de proyectos de falla (proyectos de sobrecarpetas) como una función del tiempo. Ambos métodos de análisis indicaron que la uniformidad inicial del pavimento tiene un efecto significativo en la vida del pavimento. Se demostró que vida adicional del pavimento podía ser obtenida alcanzando niveles más altos de uniformidad inicial. Resultados combinados de ambos modelos de rugosidad y análisis de falla de pavimentos indicaron que por lo menos un 9% de incremento en la vida puede alcanzarse aumentando en un 25% la uniformidad de los valores producidos de índice de perfil de 11 a 8 cm/km para pavimentos de PCC y de 8 a 6 cm/km para pavimentos de AC. Se encontró que un incremento de 50% en la uniformidad de estos valores producidos incrementa la vida del pavimento en por lo menos 15% de muchos casos. Esto es, un incremento

aproximado en la uniformidad de 11 a 6 cm/km, basada en el índice de perfil para PCC, y de 8 a 4 cm/km para AC, podría estimarse un incremento en la vida de servicio de por lo menos 15%.

Efecto de la uniformidad del pavimento en los costos de mantenimiento de un vehículo

En las instalaciones de pruebas del pavimento de Westrack cerca de Reno, Nevada, los investigadores encontraron que los pavimentos uniformes causan mejoras en la eficiencia del combustible y reduce los costos de mantenimiento de los vehículos.[18] En las instalaciones de Westrack, de 1997 a 1999, cuatro conductores viajaron en carro un promedio de 15 horas en un día, alrededor de de una pista oval de 2.9 km, simulando más de 10 años de cargas de un nivel de tráfico interestatal. Sus recorridos fueron diseñados para evaluar como afectaban el funcionamiento del pavimento las variaciones de las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente en su construcción y para validar los procedimientos de diseño y análisis de la mezcla Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave). Durante este tiempo, algunas secciones de pista desarrollaron variaciones ascendentes de rugosidad, roderas y grietas por fatiga, requiriendo una rehabilitación importante. La rehabilitación consistió en renivelar y colocar en la superficie 10 cm de AC molido.

Para determinar los efectos del cambio de calidad del pavimento en los ahorros del combustible, los datos de dos vehículos idénticos de Westrack fueron examinados por períodos, justo antes y después de la rehabilitación del circuito en marzo de 1998. Antes de la rehabilitación, el circuito tenía una condición rugosa con agrietamientos por fatiga de varias secciones de prueba y deterioros de áreas que fueron reparados después del muestreo general. El resultado de estas mejoras de la rehabilitación fue evidente en los valores del IRI del circuito, el cuál mostró que el promedio de IRI se había reducido en por lo menos 10%.

Como parte del estudio del ahorro de combustible, el precio del combustible y su temperatura, el torque y velocidad de los vehículos fueron analizados, así como los datos de inspección de uso diario de combustible y de recarga. Los datos muestran que el promedio en el rendimiento de combustible sobre un período de 8 semanas antes de la rehabilitación fue de 1.79 km/lt. Después de la rehabilitación, el promedio en el rendimiento sobre un período de 7 semanas fue de 1.86 km/lt, indicando que se mejoró un 4.5%. Todos los demás factores tales como geometría del vehículo, temperatura del aire y velocidad del viento fueron idénticos en ambos, antes y después de la rehabilitación o fueron compensados para estar dentro de los cálculos de comparación. Para una compañía de vehículos con una flotilla de operación de 1.6 millones/km, conducir en pavimentos uniformes puede significar un ahorro de combustible de 46,660 lt.

El incremento en la rugosidad del pavimento en Westrack también aumentó la frecuencia de fallas dentro de los componentes del vehículo y del remolque. Por ejemplo, durante las semanas justo antes de la rehabilitación del pavimento, los marcos del remolque se comenzaron a fracturar y requirieron ser reforzados con soldadura y la dirección de los motores y otros componentes se aflojaron con más frecuencia. Durante

los 2.5 años de las cargas de tráfico en la pista, 8 de 17 amortiguadores fallaron dos meses antes de la rehabilitación de marzo de 1998. Sobre estos 2 meses, 265,000 Equivalent Single Axle Loads (ESALs) fueron aplicadas a la pista. En contraste, los 350,000 ESALs aplicados en las 7 semanas después de la rehabilitación, dio lugar solamente a una falla de un amortiguador. La Figura 10 muestra el número de fallas de amortiguadores del remolque por millón de ESALs durante diversos períodos de tráfico. Ahorros substanciales en los costos de mantenimiento del vehículo para un pavimento uniforme podían ser alcanzados a partir de la disminución del número de fallas que se dio después de la rehabilitación.

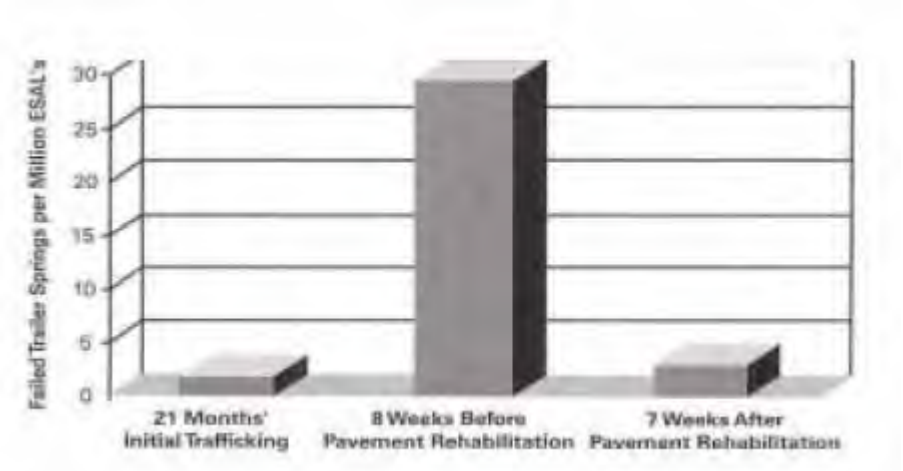


Figura 10. Efecto de la condición del pavimento en la falla de los amortiguadores de un vehículo.

CAPÍTULO 3
ÍNDICES DEL PERFIL

Introducción

Los tres índices del perfil más comunes que están actualmente en uso son el IRI, RN y el IP.

El IRI es el índice del perfil de mayor uso hoy en día para evaluar la rugosidad de las redes carreteras. El IRI fue desarrollado a inicios de la década de los 80's, como parte de un estudio que fue patrocinado por el Banco Mundial.[3] Diversos países han adoptado al IRI como parámetro para monitorear la rugosidad de sus redes carreteras. La FHWA uso los datos recabados de las secciones del HPMS que fueron colocadas a lo largo de los Estados Unidos para evaluar la condición del sistema carretero en ese país. La FHWA requirió que los estados manejaran la rugosidad de las secciones del HPMS en valores de IRI.

El RN es una estadística del perfil que fue primeramente desarrollada a inicios de la década de los 80's como resultado de una investigación conducida para dos estudios de la NCHRP realizadas por Janoff.[6,19] En 1995, la Universidad de Michigan desarrolló una versión revisada del RN.[20] El RN es un parámetro que se encuentra relacionado estrechamente para la clasificación que dan los usuarios de las carreteras a la sección de un camino.

Diversos países tienen especificaciones para la aceptación de pavimentos nuevos. El equipo más común que actualmente es usado para la medición en pavimentos nuevos es el perfilógrafo. La medición del trazo del perfil realizado por el perfilógrafo es usado para calcular el IP del pavimento. El IP es usado entonces como parámetro para la aceptación de pavimentos de nueva construcción, así como para la determinación de estímulos y sanciones. En años recientes, diversos países y contratistas han decidido adoptar perfilómetros ligeros para la medición de pavimentos nuevos. Una simulación computarizada del perfilógrafo puede ser desarrollada en los perfilómetros con los datos del perfil para obtener el IP de una sección de pavimento.

En la actualidad, diversas agencias de carreteras usan el IP que es obtenido de las mediciones de un perfilógrafo o por simulación para juzgar la calidad de un pavimento nuevo. A partir de aquí, usan las estadísticas del perfil como el IRI para monitorear la condición de su red de pavimentos. Se ha visto que existe una pequeña correlación entre el IP y el IRI. Como dos índices del perfil diferentes se usan para la medición de la uniformidad de pavimentos nuevos y para monitorear subsecuentemente la rugosidad del pavimento, se presenta una dificultad para relacionar la rugosidad del pavimento en algún momento con la uniformidad de su construcción. Actualmente, algunos países se han dirigido a la adopción de una medición consistente de uniformidad del pavimento que puede ser usada a través del ciclo de vida de un camino. Esto involucra usar el

mismo índice para la medición de pavimentos nuevos para su aceptación y para el subsiguiente monitoreo de pavimentos con propósitos de administración. Algunos países han adoptado al IRI como este índice. Dirigirse hacia este procedimiento proporciona una estadística de la rugosidad que puede ser usada para monitorear el desarrollo de un pavimento de "inicio a fin".

Índice de Rugosidad Internacional

Introducción

Casi la mayoría de los sistemas automáticos de perfilamiento del camino incluyen un software para calcular el IRI. Desde 1990, la FHWA solicitó que en las secciones del HPMS la rugosidad fuera reportada en la escala del IRI. El Banco Mundial patrocinó diversos programas de investigación a gran escala en la década de los 70's que investigaron algunas de las elecciones básicas que se presentaban en países en vías de desarrollo: ¿Los gobiernos deben pedir préstamos para construir con buena calidad caminos costosos o deben ahorrar dinero con caminos de menor calidad que sean baratos? La rugosidad del camino fue identificada como un factor básico en la relación que involucra la calidad del camino contra los costos del usuario. En el estudio se encontró que los datos de rugosidad de diferentes partes del mundo no podían compararse. Incluso los datos del mismo país eran sospechosos porque las mediciones se basaron en hardware y métodos que no son estables en el tiempo.

En 1982, el Banco Mundial inicio un experimento de semejanza en Brasil para establecer la correlación y una calibración estándar para las mediciones de rugosidad. En el procesamiento de la información se tenía claro que se tenía que hacer que casi todos los instrumentos de medición de la rugosidad en uso a través del mundo debían ser capaces de producir medidas en la misma escala, si la medida era seleccionada adecuadamente. A partir de éste punto, uno de los objetivos de los investigadores fue desarrollar el IRI, el cuál podía ser dicha escala. El IRI es el primer índice del perfil usado ampliamente donde el método de análisis se planeo para trabajar con diferentes tipos de perfiladores. Se define como una propiedad del perfil real y por lo tanto puede medirse con cualquier perfilador válido. En el momento de la investigación, los Response Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS) eran comunes, por eso el índice fue diseñado para correlacionarse adecuadamente con las salidas de estos sistemas.

Para tratar temas específicos como la medición de la rugosidad o la cuestión de la exactitud, es necesario primeramente definir una escala de rugosidad. En el interés general de usar una medición de rugosidad común en todos los proyectos significativos que se hacían en todo el mundo, fue seleccionado el IRI, como ya se comento. Fue nombrado IRI porqué fue producto del International Road Roughness Experiment (IRRE), realizado por equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica con la finalidad de encontrar tal índice. El IRRE fue llevado a cabo en Brasilia, Brasil en 1982 y contemplo el control de las mediaciones de rugosidad del camino para un número de caminos bajo una variedad de condiciones, instrumentos y

métodos. La escala de rugosidad seleccionada IRI, fue la que mejor cumplió el criterio de ser estable en el tiempo, transportable y relevante, además de que también era fácilmente medible para la mayoría de los participantes.

Propiedades del análisis del IRI

El IRI es la relación de mediciones de rugosidad estandarizadas obtenidas de los RTRRMS, con unidades recomendadas de: metros por kilómetro (m/km), milímetros por metro (mm/m) = (pendiente) (1000). La medición obtenida de un RTRRMS puede ser llamada de dos maneras por su nombre técnico, Average Rectified Slope (ARS), o más comúnmente, por las unidades usadas (mm/km, in/mi, etc.). La medición de la ARS es la relación del movimiento acumulado de la suspensión de un vehículo (mm, in, etc.), dividida por la distancia recorrida por el vehículo durante la prueba (km, mi, etc.). La referencia usada para el IRI en los RTRRMS es un modelo matemático, más que un sistema mecánico, que se encuentra en forma de programa de cómputo aplicado a la medición de perfiles. El programa de cómputo es llamado Quarter Car Simulation (QCS), porque el modelo matemático representa a un RTRRMS que tiene una sola rueda, como el Truck Boom Integrator (TBI) y el rugosimetro del Bureau of Public Roads (BPR) de los Estados Unidos, que se muestra en la Figura 11. Cuando es obtenida de la simulación de referencia, la medición es llamada Reference Average Rectified Slope (RARS). Este tipo de mediciones varía con la velocidad del vehículo, y por lo tanto, se especifica una velocidad estándar de 80 KPH en la definición del IRI. De esta forma, el nombre técnico para el IRI es Reference Average Rectified Slope a 80 KPH (RRRS80), que índica la medición de la Pendiente Rectificada Promedio de un instrumento de referencia (R) a una velocidad de 80 KPH.

Figura 11. Rugosimetro del Departamento Público de Carreteras (BPR).

El modelo matemático usado en el vehículo para definir el IRI es el mismo que se describe en el Reporte 228 de la NCHRP de 1981, con la única diferencia de que el IRI es calculado independientemente para cada rodada. El modelo en el reporte 228 de la

NCHRP fue calculado simultáneamente para las dos rodadas, de esta manera se reproduce el funcionamiento del RTRRMS basado en un vehiculo de pasajeros o en un remolque de dos ruedas. La versión de IRI es más transportable y fue demostrado que el rendimiento y exactitud del RTRRMS se encuentra por arriba de la versión de la NCHRP para todos los tipos de RTRRMS.

El IRI se define como una característica del perfil longitudinal del recorrido de la rodada, más que una característica de una parte del hardware, para asegurar su estabilidad en el tiempo, esto es, la medición directa del IRI requiere que el perfil de la rodada sea obtenido.

La característica particular del perfil que define el IRI fue demostrar que podía ser medido directamente por la mayoría de los métodos perfilométricos (más que cualquier otro perfil basado en representaciones numéricas de la rugosidad que eran consideradas en la IRRE). Al mismo tiempo, la características del perfil de IRI es tan altamente compatible con las mediciones obtenidas por los RTRRMS que estos instrumentos pueden calibrarse a la escala del IRI para obtener la mejor exactitud (o muy cercana a la mejor) que es posible obtener con este tipo de instrumentos. El IRI también se relaciona fuertemente con las opiniones subjetivas que tiene el público de la rugosidad del camino. Porque el IRI es:

1. Medible por muchos métodos perfilométricos.
2. La fuerte correlación de las medidas de los RTRRMS.
3. La fuerte correlación con las opiniones subjetivas, que es una escala altamente transportable.

El cálculo del IRI se basa en un modelo matemático denominado Quarter Car Model (QCM). El modelo matemático calcula la desviación de la suspensión de una simulación de un sistema mecánico con una respuesta similar a la de un coche de pasajeros. La simulación del movimiento de la suspensión es acumulada y dividida por la distancia del recorrido para dar un índice, que como ya se señalo, tiene unidades de pendiente (m/km o mm/m). La simulación matemática es llevada a un programa de cómputo el cuál se muestra esquemáticamente en la Figura 12.[21] El QCM usado en el algoritmo del IRI es justo lo que su nombre implica: un modelo de una esquina de un carro (un cuarto). Como se ve en la Figura 12, el cuarto de carro es modelado como: un neumático que es representado por un resorte vertical, la masa del eje soportada por el neumático, un amortiguador y muelle, y la masa del cuerpo soportada por la suspensión en el neumático.

Cuando el IRI fue desarrollado, el QCM fue detallado para maximizar las correlaciones con los RTRRMS. La QCS fue una representación teórica de los sistemas de tipo respuesta en uso en el momento en que el IRI fue desarrollado, con las propiedades del vehiculo del cuarto de carro ajustado para obtener la máxima correlación con la salida de estos sistemas.

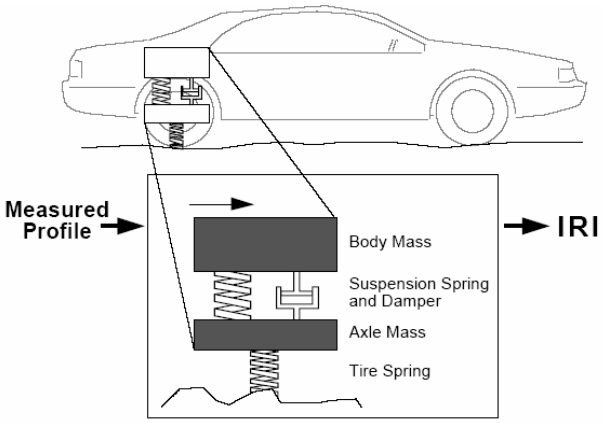


Figura 12. Ilustración del algoritmo de cómputo usado para calcular el IRI.

La respuesta del IRI en sinusoides es intencionalmente muy similar a la medición física de la respuesta de los vehículos carreteros. Fue principalmente desarrollada para igualar las respuestas de los carros de pasajeros, aunque posteriormente la investigación mostró una buena correlación con camiones ligeros y pesados. El IRI ha sido reconocido como un índice de rugosidad de propósito general que tiene una fuerte correlación con la mayoría de las clases de respuesta de los vehículos que eran de interés. Específicamente, el IRI es altamente correlacionado con tres variables de respuesta de vehículos que son de interés: respuesta del medidor del camino (por continuidad histórica), aceleración vertical de pasajeros (por calidad del viaje) y carga de neumático (para el control del vehículo y la seguridad).

La respuesta del número de onda del filtro de cuarto de carro del IRI se muestra en la Figura 13. La amplitud de la sinusoide de salida es la amplitud de la entrada multiplicada por el incremento que se muestra en la figura, el cuál es de menor dimensión. El IRI esta influenciado por longitudes de onda que se extienden de 1.2 a 30.5 m. El filtro del IRI tiene sensibilidad máxima a sinusoides de pendiente con números de onda cercanos a 0.065 ciclos/m (longitud de onda de 15.4 m) y 0.42 ciclos/m (longitud de onda de 2.4 m). La respuesta es baja para números de onda de 0.03 y 1.6, y de 0.75 ciclos/m, a los cuales le corresponden longitudes de onda de 30.5 y 1.2 m, respectivamente. Sin embargo, todavía existe alguna respuesta para longitudes de onda fuera de este rango.

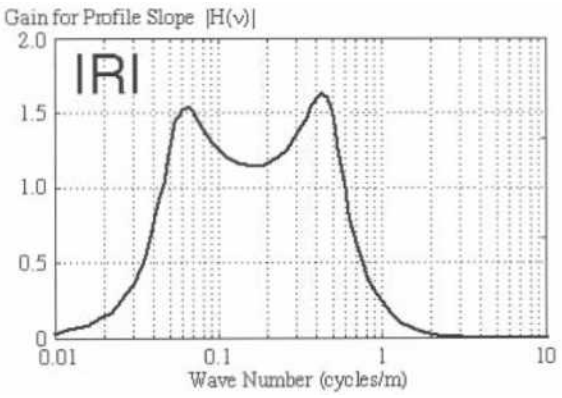


Figura 13. Respuesta del filtro del IRI.

Cálculo del IRI

El cálculo del IRI a partir de los datos de un perfil es desarrollado por un programa de cómputo. La Norma Estándar ASTM E 1926-98, "Práctica Estándar para Calcular el Índice de rugosidad internacional de Caminos a partir de las Mediciones del Perfil Longitudinal", presenta el programa de cómputo que se debe usar para calcular el IRI. Los pasos específicos que se toman en el programa de cómputo para calcular el IRI son:

1. *El IRI es calculado por un perfil individual*: El procesamiento del IRI es desarrollado de los datos de un perfil que es obtenido para una rodada específica del perfil. Muchos perfiladores recaban los datos a lo largo de dos rodadas. El cálculo del IRI debe cuidarse de hacerse separadamente en cada rodada.
2. *El perfil es filtrado como un promedio móvil que se toma a una longitud base de cada 250 mm*: El promedio móvil es un filtro de paso bajo (atenúa longitudes de onda corta) que uniformiza el perfil. El filtro de promedio móvil es aplicado por el programa de cómputo. El filtro de promedio móvil de 250 mm puede ser omitido si el perfil ha sido ya filtrado por un promedio móvil o con un filtro de anti-alisamiento el cuál atenúa longitudes de onda corta de 0.6 m. Por ejemplo, existen algunos perfiladores de la compañía K. J. Law en operación que obtienen mediciones del perfil a intervalos de 25 mm, posteriormente aplican un promedio móvil a 300 mm y después almacenan los resultados a intervalos de 150 mm. Esto es muy importante para evitar el filtro de promedio móvil de 250 mm cuando se procesan los perfiles a partir de tales sistemas.
3. *La simulación del cuarto de carro es desarrollada en el perfil*: Los parámetros del cuarto de carro están definidos en el programa del IRI. La simulación del cuarto de carro en el perfil es desarrollada por una velocidad de simulación de 80 KPH y los movimientos de la suspensión del cuarto de carro son acumulados.
4. *Cálculo del IRI*: Los valores absolutos del movimiento de la suspensión que son obtenidos a partir de la simulación son sumados y posteriormente divididos por la longitud del perfil para obtener el promedio del movimiento de la suspensión en la longitud simulada. El valor que se calcula es el IRI y tiene unidades de pendiente con las unidades más comunes de m/km o mm/m.
5. *Media del IRI*: El IRI es obtenido para un específico perfil de rodada. Diversos perfiladores recaban los datos del perfil a lo largo de dos rodadas. El valor del IRI puede calcularse para cada rodada. El promedio de estos dos valores es conocido como media del IRI y representa una vista general de la rugosidad de una carretera.

Requerimientos del equipo

Los análisis han demostrado que para el cálculo del IRI, el intervalo de muestra de un perfilador debe ser de 167 mm o menor.[22] Sí los datos del perfil son muestreados a intervalos de 167 mm o menores y se obtiene antes un promedio antes de salvarlos, entonces el intervalo debe ser de 250 mm o menor para calcular con exactitud el IRI.

Rangos de rugosidad en la escala del IRI

En el experimento patrocinado por el Banco Mundial se obtuvieron valores de rugosidad definidos en base a la escala del IRI, en la Figura 14 se muestra los rangos aproximados de rugosidad de IRI para diferentes tipos de caminos.

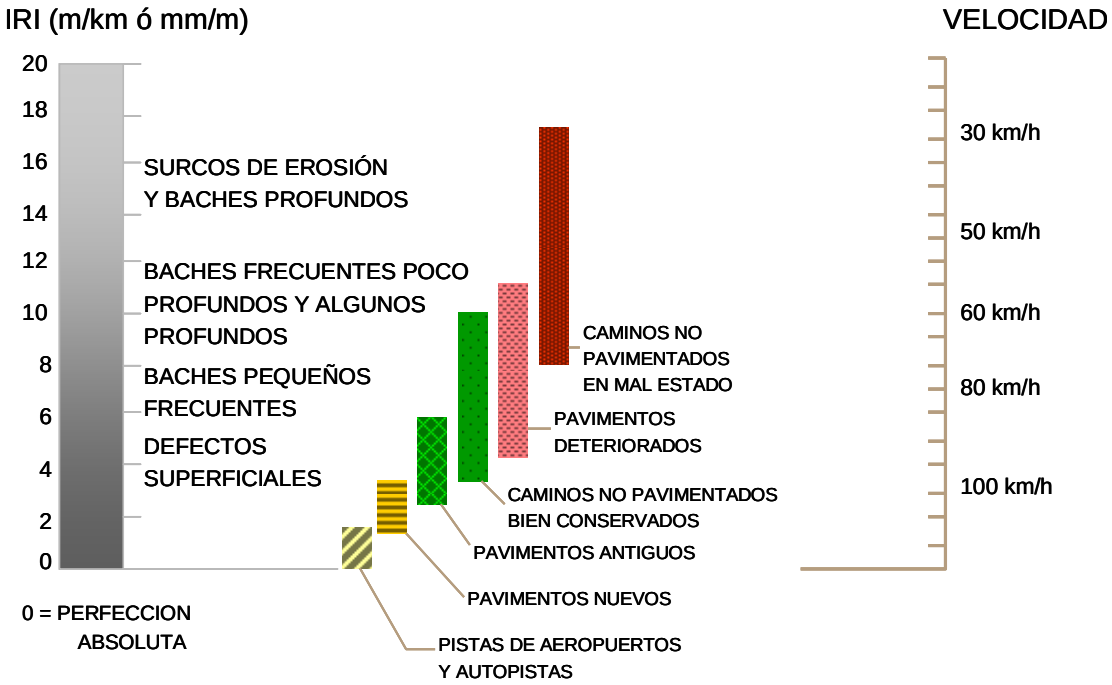


Figura 14. Escala de rugosidad en base al IRI.

Debe de reconocerse que el IRI es un valor numérico que resume la cualidad de la rugosidad que impacta en la respuesta del vehículo, pero que puede no ser apropiada para otras aplicaciones. Más específicamente, el IRI es apropiado cuando se desea medir la rugosidad para relacionarla a:

- Gastos de operación total del vehiculo.
- Calidad total del viaje.
- Cargas dinámicas de neumáticos (daños al camino por camiones pesados, límites de seguridad de frenado y aceleración disponible en los vehículos).
- Condición total de la superficie.

El IRI también se recomienda siempre que las mediciones sean obtenidas usando un RTRRMS a las velocidades de la carretera (50 a 100 KPH), sin importar el uso que se haga de los datos.

Métodos de medición de la rugosidad

Las diversas propuestas para medir la rugosidad de un camino que se encuentran en uso a través del mundo pueden agruparse en cuatro clases genéricas, de acuerdo a como sus medidas se asocian directamente al IRI, que alteraciones afectan los requisitos de calibración y la exactitud asociada con su uso.

Clase 1: Perfiles de precisión

Esta clase representa los estándares más altos de exactitud para la medición del IRI. El método de clase 1 requiere que el perfil longitudinal de la rodada sea medido (como una serie de puntos exactos de elevación en un espacio corto a lo largo del recorrido de la trayectoria de la rueda) como una base para calcular el valor del IRI. Para los métodos estáticos perfilométricos, la distancia entre los puntos tomados no debe ser mayor de 250 mm (4 mediciones/metro) y la precisión en las mediciones de elevación debe ser 0.5 mm para la mayoría de los pavimentos lisos. Los perfilómetros de alta velocidad ofrecen un potencial mayor para medir rápidamente el IRI; de cualquier manera, los perfilómetros deben ser certificados en un cierto tiempo a través de un procedimiento establecido para verificar su exactitud, como el de estadal y nivel. Actualmente, se ha demostrado que solamente los métodos del estadal y nivel y la viga del TRRL son validos como métodos de Clase 1 para determinar el IRI sobre un gran rango de niveles de rugosidad y tipos de caminos para la longitud de 320 m del sitio usado en la IRRE.

Los métodos en esta clase son aquellos que producen mediciones de tan alta calidad que cuando se reproduce el IRI no puede ser mejorado por otro procedimiento. Mientras que esta definición en primera instancia aparece como un ideal inalcanzable, existe un límite práctico de la capacidad de repetición que puede ser obtenido de las mediciones de rugosidad del camino, regularmente con un método y/o instrumento “perfecto”. El límite práctico resulta de la imposibilidad de medir la rugosidad repetidamente exactamente en el mismo lugar de la rodada. Por lo tanto, un método clasifica como clase 1 si el error de medición resulta insignificante en comparación con la incertidumbre asociada con la dificultad de localizar exactamente las mismas rodadas.

Los métodos encontrados en el IRRE para calificar como clase 1 tienen un error de medición insignificante para los sitios de 320 m de longitud, cuando las rodadas fueron marcadas con pintura con puntos espaciados en intervalos cercanos a 20 m. La capacidad de repetición de IRI bajo estas condiciones es alrededor de 0.3 m/km en caminos pavimentados y cerca de 0.5 m/km para todos los demás tipos de camino.

Para marcas más exactas en las rodadas, los métodos descritos en el presente escrito como clase 1 podrían no calificar como tal (aunque no es frecuente que sea necesario aplicar un alto nivel de exactitud). Por otro lado, especificaciones menos rigurosas pudieron ser convenientes si los sitios de prueba usados fueran más largos, o si las rodadas no fueron marcadas en su totalidad.

En muchos casos, un método que mide con este nivel de exactitud tendrá una desventaja asociada a un mayor esfuerzo para hacer la medición de la rugosidad (por

ejemplo, por el método de estadal y nivel). La exactitud obtenida usando el método de clase 1 por definición iguala o excede los requisitos necesarios para su aplicación, y esto permite que el método de Clase 1 sea visto como una herramienta básica para validar otros métodos o cuando se requieren datos especiales con un alto nivel de exactitud.

Clase 2: Otros métodos perfilómetricos

Esta clase incluye todos los demás métodos en los cuales se mide el perfil como la base para el cálculo directo del IRI, sin que tengan en su medición el nivel de exactitud que se requiere para la clase 1. Aunque el equipo y los métodos usados para la medición de perfiles son verificados funcionalmente mediante procesos independientes de calibración, se limitan a la exactitud o al menor ancho de banda que se necesita para calificar como un método de clase 1. Consecuentemente, el valor del IRI calculado de la medición de un perfil de Clase 2 puede no ser exacto para el límite práctico, debido a los errores aleatorios que se encuentran sobre un mismo rango de condiciones. Esta clase incluye valores calculados del IRI de medición de perfiles hechos con perfilómetros de alta velocidad y con métodos estáticos que no satisfacían la precisión y/o el intervalo de medición requerido.

Actualmente, el remolque APL es el único perfilómetro dinámico que ha sido experimentalmente validado sobre el rango de rugosidad que se cubre en el IRRE. El perfilómetro inercial del tipo GMR con ruedas seguidoras ha sido validado para caminos con niveles de rugosidad menores que un valor de IRI de aproximadamente 3 m/km [23], sobre los cuales se introducen los errores debidos a los rebotes de las ruedas seguidoras. Este tipo de diseño no es muy comercial y solo se encuentra disponible en los Estados Unidos; de cualquier manera, como las ruedas seguidoras han sido reemplazadas con sensores sin contacto para eliminar el problema del rebote. Dos perfilómetros de alta velocidad fueron vendidos en esos momentos por la compañía K.J Law y ambos están diseñados para obtener la rugosidad del IRI durante la medición. En la actualidad los dos están considerados como sistemas de clase 2, aunque su exactitud y rango de operación no habían sido verificados todavía contra el estadal y nivel. Pruebas con estos y otros perfilómetros han sido realizadas, pero los análisis de los datos aún no han sido completados todavía lo suficientemente para cuantificar su capacidad de medición de IRI.

En 1984 se desarrollo una reunión de perfilómetros de caminos en la ciudad de Ann Arbor, Michigan, para determinar las características del comportamiento de un número de perfilómetros, incluyendo los dos sistemas sin contacto que tenía K.J. Law, el sistema sueco láser VTI, el remolque APL y diversos sistemas no comerciales. El estudio, fue instituido por la FHWA y dirigido por la UMTRI.[24]

Los perfilómetros de alta velocidad tienen la desventaja de ser sistemas muy costosos y con un complejo sistema de instrumentación usado para medir la rugosidad del camino y generalmente requiere de operadores con algún entrenamiento de ingeniería; sin embargo, ofrecen la gran ventaja de mediciones de alta calidad de forma rápida, sin requerir un gran esfuerzo para mantener la calibración. Los procedimientos detallados

para la operación de un perfilómetro en la medición del IRI son especificados claramente en el diseño del perfilómetro; por lo tanto, se debe consultar al fabricante.

Clase 3: Estimación del IRI con ecuaciones de correlación

En gran medida, la mayoría de los datos de rugosidad del camino que son recabados hoy en día a través del mundo son obtenidos con los RTRRMS. Las medidas de los RTRRMS dependen de la forma en que se escalen las mediciones con la dinámica del vehículo para precisar las características de rugosidad que sean comparables con el IRI. Las propiedades dinámicas son únicas para cada vehículo, sin embargo, si se hace el cambio a tiempo, esto es, que las medidas directas sin filtrar del ARS obtenidas de los RTRRMS pueden ser corregidas a la escala del IRI usando una ecuación de calibración que se obtenga experimentalmente para cada RTRRMS específico. Debido a que las dinámicas del vehículo cambian fácilmente, deben emplearse procedimientos de operación y mantenimiento muy rigurosos para los vehículos usados y el control de las pruebas debe llevarse a cabo como parte de las operaciones normales. Cuando los cambios ocurren, no es fácil aplicar una corrección simple; lo mejor, es volver a calibrar el sistema del vehículo de medición del camino de forma total.

Esta clase también incluye otros instrumentos de medición de la rugosidad capaces de generar un valor numérico de la rugosidad que puede ser correlacionada razonablemente con el IRI (por ejemplo, la regla balanceada). Las mediciones obtenidas pueden usarse para estimar el IRI a través de ecuaciones de regresión si un experimento de correlación es desarrollado. Este acercamiento es visto generalmente más complejo de lo que es (mejores mediciones pueden ser obtenidas con menor esfuerzo), a menos que sea necesario convertir una gran cantidad de datos anteriores a la escala del IRI.

Un método para medición de rugosidad califica como clase 3 si aplica el uso de la *calibración por correlación*, sin importar que tipo de instrumentación o vehiculo se usa para obtener la medición de la rugosidad sin corregir. Mientras que la mayoría de los métodos de clase 3 emplean un medidor del camino que acumule el movimiento en la suspensión para medir el ARS, otros sistemas que están en uso emplean acelerómetros u otro tipo de instrumentación; sin embargo, el medidor del camino (Road Meter) basado en el RTRRMS hace que las mediciones de la ARS se emparejen lo más cerca posible al concepto del IRI, por lo que la calibración del RTRRMS se concentra en el principio del método de clase 3.

Para que un RTRRMS sea calificado como un método de clase 3 debe ser calibrado por correlación. Sin calibración no se puede verificar el vínculo entre las mediciones obtenidas con dos RTRRMS, ni a la escala del IRI.

La reproducibilidad asociada con la calibración de un RTRRMS es aproximadamente de 0.5 m/km (14%) para caminos pavimentados con secciones de 320 m de longitud y de 1.0 m/km (18%) para superficies no pavimentadas de la misma longitud. Estas cifras de exactitud son solamente promedios aproximados, ya que los errores generalmente varían con el tipo de superficie y rugosidad. Una mejor exactitud es posible si se usan secciones de prueba más largas.

Clase 4: Valores subjetivos y medidas sin calibrar

Existen situaciones en las que se necesita una base de datos de rugosidad, pero no es necesario tener una alta exactitud, ni puede conseguirse. No obstante, es deseable que las medidas se relacionen a la escala del IRI. En esto casos, una evaluación subjetiva que involucre una opinión del viaje del camino o una inspección visual pueden ser usadas. Otra posibilidad es usar las mediciones de un instrumento sin calibrar. La conversión de estas observaciones a la escala de IRI está limitada a una equivalencia aproximada, la cual puede establecerse de la mejor manera por la comparación de la descripción verbal y/o gráfica de los caminos y de su identificación con los valores asociados al IRI. Básicamente, el valor de la equivalencia esta en la calibración, aunque sea aproximada, y puede ser considerada como “calibración por descripción”.

Cuando estos valores subjetivos de la rugosidad son convertidos a la escala del IRI la resolución se limita a seis niveles de rugosidad con una exactitud que va de 2-6 m/km (cerca del 35%) en la escala de IRI. (La exactitud de la rugosidad expresada ya sea en unidades absolutas de m/km o como porcentaje, varía generalmente con el nivel de rugosidad y con el tipo de superficie).

Se debe observar que a menos que la calibración se valide por correlación cuando se usa un RTRRMS, no existe manera de ligar la medición a la escala estándar. Así, un RTRRMS sin calibrar desciende de nivel y es considerado como de Clase 4.

Número de Viaje

Introducción

Por décadas, los ingenieros de carreteras se han interesado en la estimación de la opinión del público que viaja de la rugosidad de las carreteras. La escala del PSI obtenida de la prueba del camino de la AASHO ha sido de interés paro los ingenieros desde su introducción en la década de los 50’s. El RN es un índice del perfil diseñado para indicar la habilidad del viaje en una escala similar a la del PSI. Las mediciones del perfil longitudinal tomadas con un perfilómetro son procesadas usando un programa de cómputo para obtener el RN, el cuál iguala la media de un grupo de índices de un grupo de índices.

La NCHRP financio dos proyectos de investigación del Dr. Michael Janoff en la década de los 80’s que investigaban el efecto de la rugosidad superficial de las carreteras en el confort del viaje. El objetivo de esta investigación fue determinar cómo las características en los perfiles del camino eran vinculadas a la opinión subjetiva a cerca del camino de miembros del público. Durante los dos estudios, espaciados aproximadamente en un intervalo de 5 años, la Mean Panel Ratings (MPR) fue determinada experimentalmente en una escala de 0 a 5 para sitios de prueba en

diversos Estados de Norteamérica. Los perfiles longitudinales fueron obtenidos para las rodadas izquierda y derecha de las líneas que fueron de interés. Los análisis basados en el perfil fueron desarrollados el MPR. Un método fue desarrollado en el cuál las funciones de la PSD fueron calculadas para dos perfiles longitudinales y reducidas para producir un resumen estadístico llamado IP. Los valores de IP para los dos perfiles se combinaron en una transformación no lineal para obtener una estimación de la MPR. El procedimiento matemático desarrollado para calcular el RN se describe en el reporte 275 del NCHRP, pero no de forma detallada. El software para calcular el RN por el método de de la PSD no se desarrolló para su uso general. Conviene hacer notar que no existe relación entre el IP usado para los cálculos del RN con el IP obtenido a partir de los trazos de un perfilógrafo.

En 1995, algunos de los datos de estos dos proyectos del NCHRP y un estudio grupal llevado a cabo en Minnesota, Estados Unidos, fueron analizados nuevamente por la University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI) para un estudio financiado en conjunto a iniciativa de la FHWA. El objetivo fue desarrollar y probar un proceso matemático práctico para obtener el RN. Los datos del perfil en la investigación original del NCHRP fueron obtenidos de diversos instrumentos. Muchas mediciones fueron realizadas con un perfilómetro K. J. Law propiedad del Departamento de Transportes de Ohio de los Estados Unidos y fue elegido por su exactitud. El nuevo análisis se limitó a 138 sitios de prueba que fueron perfilados con el sistema de Ohio y con datos del estudio de Minnesota. Basados en los análisis de estos datos, un nuevo método de análisis del perfil para calcular el RN fue desarrollado. Este procedimiento predice un poco mejor la MPR que los algoritmos previamente publicados y lo más importante es portátil. El software fue probado en perfiles obtenidos de diferentes sistemas en los mismos sitios y valores similares de RN fueron obtenidos.

Propiedades de los análisis del Número de Viaje

El RN usa una escala de 0 a 5, la cuál fue seleccionada debido a que es familiar para la comunidad carretera. El RN es una transformación no lineal de una estadística llamada IP que es calculado a partir de los datos del perfil. Los rangos de IP van de 0 (un perfil perfectamente uniforme) a un valor positivo proporcional a la rugosidad. El IP es transformado a una escala que va de 5 (uniformidad perfecta) a 0 (la máxima rugosidad posible).

La Figura 15 muestra la sensibilidad del IP a una sinusoide inclinada. Cuando una sinusoide es tomada como una entrada, el filtro del IP produce una sinusoide como salida. La amplitud de la sinusoide de salida es la amplitud de la de entrada multiplicada por el “incremento” (gain) que se muestra en la Figura 15. La sensibilidad máxima es para un número de onda de 0.164 ciclos/m, el cuál es una longitud de onda de aproximadamente 6.1 m.

El contenido de un perfil del camino que afecta al RN es deferente del contenido que afecta al IRI. El IRI tiene una sensibilidad alta a sinusoides con un número de onda de 0.065 ciclos/m, el cuál corresponde a una longitud de onda de 15.4 m. La Figura 15 muestra que el RN tiene una sensibilidad baja a esa longitud de onda e incluso sensibilidad más baja para longitudes de onda más largas. El IRI y el RN no siempre

correlacionan de la misma manera, ni con el mismo significado. Esto es, cada uno de ellos proporciona una información única a cerca de la rugosidad de la carretera. Los valores del RN para secciones adyacentes no pueden ser promediados. Por ejemplo, si un kilómetro tiene un valor de RN de 3 y el siguiente tiene uno de 4, el RN para los dos segmentos de kilómetro no es 3.5, es 3.37.

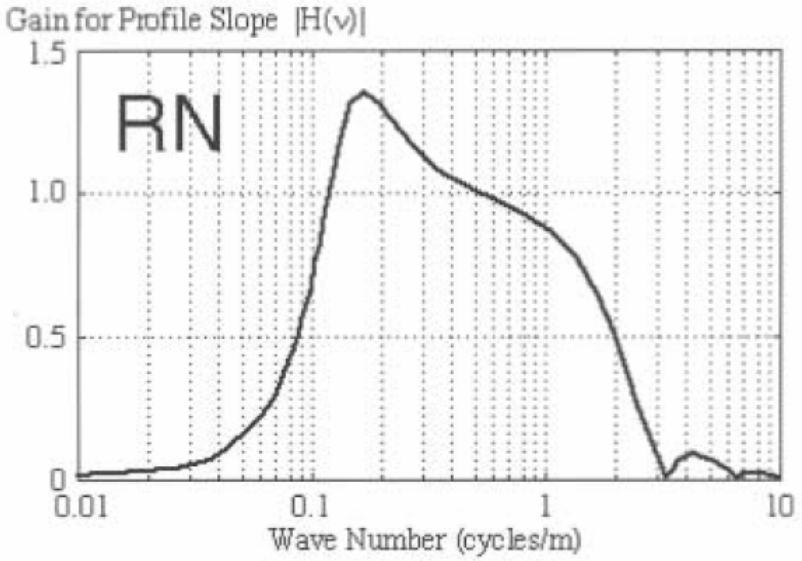


Figura 15. Sensibilidad del IP a una sinusoide inclinada.

Cálculo del Número de Viaje

La norma Estándar ASTM E 1489-98[15], *Práctica Estándar para Calcular el Número de Viaje de las Mediciones de un Perfil Longitudinal hechas con un Dispositivo de Medición del Perfil Inercial*, presenta el programa de cómputo que puede ser usado para calcular el RN. Los pasos específicos que se toman en el programa de cómputo para calcular el RN son:

1. *El RN es calculado para un perfil individual*: El cálculo del RN es desarrollado por los datos de un perfil que es obtenido para una específica rodada del perfil. Muchos perfilómetros recaban los datos a lo largo de las dos rodadas. El procedimiento para el cómputo total del RN para un camino a partir de los datos del perfil obtenido de dos rodadas también puede ser obtenido.
2. *El perfil es filtrado con una media móvil que tiene una longitud base de 250 mm*: El promedio móvil es un filtro de paso bajo (atenúa longitudes de onda cortas) que uniformiza el perfil. El filtro de media móvil es aplicado por el programa de cómputo. El filtro de media móvil de 250 mm puede ser omitido si el perfil ha sido ya filtrado por una media móvil con un filtro de anti-alisamiento que atenúa longitudes de onda corta de 0.6 m. Por ejemplo, existen algunos perfilómetros K. J. Law en operación que obtienen medidas del perfil a intervalos de 25 mm, posteriormente aplica una media móvil de 300 mm y almacena los resultados a intervalos de 150 mm. Esto es importante para evitar el filtro de 250 mm cuando se procesan los perfiles con tales sistemas.

3. *El perfil es filtrado adicionalmente con un filtro de paso de banda*: El filtro usa la misma ecuación que el modelo de cuarto de carro en el IRI; sin embargo, coeficientes diferentes son usados para obtener la sensibilidad al número de onda, como se observa en la Figura 15.
4. *El perfil filtrado a un IP dado*: El perfil filtrado es reducido para obtener el valor de la RMS llamado Índice de Perfil, que tiene unidades de pendiente (m/m).
5. *El IP es transformado a RN*: El RN es definido como una transformación exponencial del IP, conforme a la siguiente ecuación:

$$RN = 5e^{(-160\,IP)}$$

Si un perfil individual es procesado, su IP es transformado en el RN como se muestra en la ecuación de arriba. Si dos perfiles de la rodada izquierda y derecha son procesados, los valores del IP para las dos rodadas son combinados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IP = \left[\left(\frac{IP_{izq}^2 + IP_{der}^2}{2}\right)\right]^{1/2}$$

El IP_{izq} y el IP_{der} son el IP para las rodadas izquierda y derecha, respectivamente. De aquí en adelante, los valores del IP son transformados en RN usando la ecuación señalada en el paso 5, mencionado arriba.

Requerimientos del equipo

Los análisis muestran que para el cálculo del RN los datos del perfil deben ser obtenidos a intervalos de muestra de 50 mm o menores. Si los datos del perfil son muestreados a intervalos de 50 mm o menores y se promedian antes de salvarlos, el intervalo de grabación debe ser de 75 mm o menores para calcular con exactitud el RN. Los perfiles obtenidos con perfilómetros ultrasónicos no son válidos para obtener el RN. Los resultados de la investigación muestran que muchos perfiles obtenidos con sistemas ultrasónicos dan resultados incorrectos. Para estos perfiles, los valores calculados del IP son muy altos y los valores correspondientes al RN son demasiado bajos.

Índice de Perfil

Introducción

Los perfilógrafos han sido usados ampliamente para medir la uniformidad de pavimentos nuevos. Los perfilógrafos proporcionan un trazo del perfil de un pavimento, el cuál es reducido para obtener un parámetro llamado Índice de Perfil, que es usado para juzgar la uniformidad del pavimento. Es conveniente señalar que el IP obtenido del trazo de un perfilógrafo no tiene relación al IP que se usa en el cálculo del RN.

Aproximadamente a mediados de la década de los 80's todos los perfilógrafos en uso eran de tipo mecánico. El trazo obtenido por los perfilógrafos mecánicos era reducido manualmente por un técnico. Cómo la reducción del trazo del perfilógrafo es subjetiva y depende de la valoración, puede haber variación en los resultados que sean obtenidos. A mediados de la década de los 80's, hicieron su aparición los perfilógrafos computarizados. Estos perfilógrafos grababan los datos del perfil y los reducían usando un programa de cómputo para calcular el IP. Esto eliminaba la subjetividad de la reducción del trazo del perfilógrafo que ocurría cuando se usaba la valoración. El siguiente desarrollo más importante en la reducción del trazo del perfilógrafo ocurrió cuando el sistema Proscan fue desarrollado por Devore.[25] En el sistema Proscan, el trazo grabado por un perfilógrafo mecánico es escaneado y la reducción de los datos es desarrollada por un programa de cómputo que calcula el IP. Este procedimiento elimina la subjetividad que ocurría con la valoración.

Conviene hacer notar que lo anterior no es un estándar universal que sea seguido por todas las agencias estatales e incluso los países, en la reducción del trazo de los perfilógrafos. Cada una de las agencias estatales en los Estados Unidos tiene su procedimiento estandarizado para reducir los trazos del perfilógrafo. Por lo tanto, las comparaciones entre los diversos valores estatales señalados no son significativas, debido a las diferencias que existen en la reducción del trazo del perfilógrafo. El Estado de California, la cuál tiene una amplia experiencia con el uso de los perfilógrafos usa los procedimientos descritos en el Método de Prueba de California 526 para la reducción de los trazos del perfilógrafo.

Lo siguiente, es el procedimiento general que se ha seguido en la reducción de los trazos del perfilógrafo para obtener el IP. En los perfilógrafos computarizados y en el sistema Proscan, este procedimiento se desarrolla por un programa de cómputo.

Perfilar el trazo del perfil

El primer paso en la reducción del trazo se hace perfilando el trazo. Una pluma roja de punto mediano o algún otro color que contraste es típicamente usada para perfilar el trazo. Perfilando consiste en dibujar una nueva línea del perfil a través del punto medio de los picos del trazo de campo, como el que se muestra en la Figura 16. El propósito del perfilamiento es promediar los picos que están fuera y las desviaciones menores causadas por rocas, textura, suciedad o grietas transversales. El perfilamiento es uno de los varios aspectos subjetivos de la reducción del trazo, tanto en el ancho de la línea como en la manera en la cuál se promedia el trazo de campo. El perfilamiento del trazo facilita el proceso de reducción del trazo. El perfilamiento no es una parte del trabajo desarrollado originalmente para el concepto de la banda de borrado o tolerancia y actualmente no se incluye en el Método de Prueba de California 526. Se asume que esto ha ido en aumento en los métodos que muchas agencias han adoptado a través de los años para reducir la variabilidad y facilitar la reducción del trazo. Se ha reportado que el perfilamiento del trazo de campo antes de la reducción del trazo puede disminuir el IP de 1.6 a 3.2 cm/km. [26]

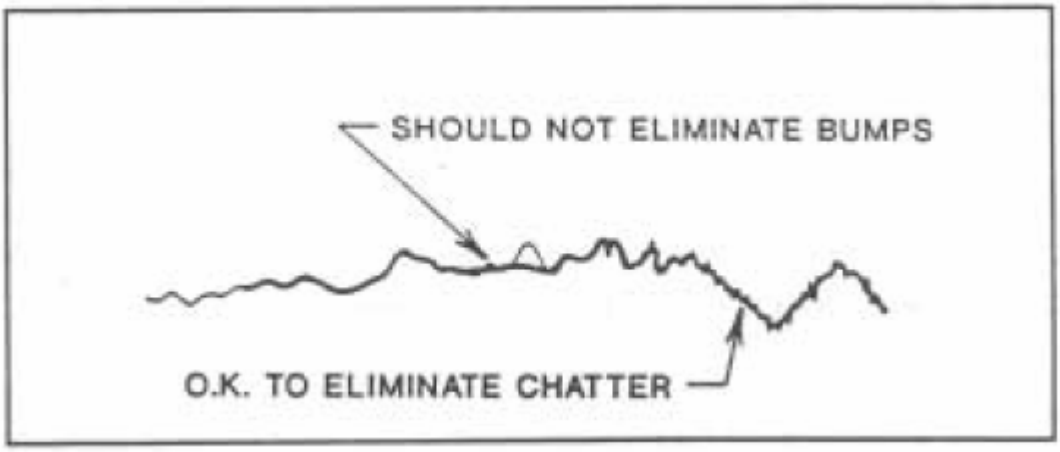


Figura 16. Ejemplo de un trazo perfilado.

Posición de la banda de borrado

El siguiente proceso en la reducción del trazo es colocar la banda de borrado en el trazo del perfil. La banda de borrado está hecha de plástico y tiene una longitud de 53.65 cm y ancho de 4.32 cm. Esta banda representa una longitud de pavimento de 160 m (escala de 1:25) en dirección horizontal y escala real en la dirección vertical (escala 1:1). En el centro de esta escala se encuentra una banda opaca de 5.08 mm de ancho extendida en la longitud total de la escala. Paralelos a la banda opaca en ambos lados están cinco líneas marcadas a cada 2.54 mm. Estas líneas sirven como la escala para medir las divergencias en distancia o las crestas que se extienden arriba o debajo de la banda de borrado opaca o tolerancia. La banda de borrado se coloca sobre el trazo del perfil de manera que no se dejen muchos espacios fuera del perfil como sea posible. La colocación de la banda de borrado debe ser tal que las divergencias o crestas sean eventualmente distribuidas arriba y abajo. Cuando se reduce un trazo mayor a 160 m, es importante observar varios segmentos hacia delante de manera que la banda de borrado se coloque en la mejor posición para el trazo completo. Esto puede requerir un poco de prueba y error antes de que la reducción óptima sea encontrada. Una vez que la posición correcta es establecida para la banda de borrado del segmento individual, las esquinas de la banda de borrado deben ser marcadas. Esto permite alinear apropiadamente el siguiente segmento (si lo requiere) y facilita la revisión de los resultados.

Dos factores involucrados en el posicionamiento de la banda de borrado pueden afectar los resultados. El primero es el uso de la posición seleccionada. A partir de que el criterio esta involucrado en el posicionamiento de la plantilla, ésta no es la única solución a el problema. El nivel de entrenamiento y experiencia pueden afectar significativamente la colocación y por consiguiente los resultados. El segundo factor involucra la interpretación de las especificaciones. Esto puede ser demostrado claramente con el ejemplo que se muestra en la Figura 17. La parte superior de la figura indica un método de movimiento de sección a sección a través del trazo. En este ejemplo, el final de la última sección evaluada es usado como guía a la cuál la sección siguiente debe ser alineada. La sección inferior de la figura indica como secciones adyacentes pueden tratarse independientemente.

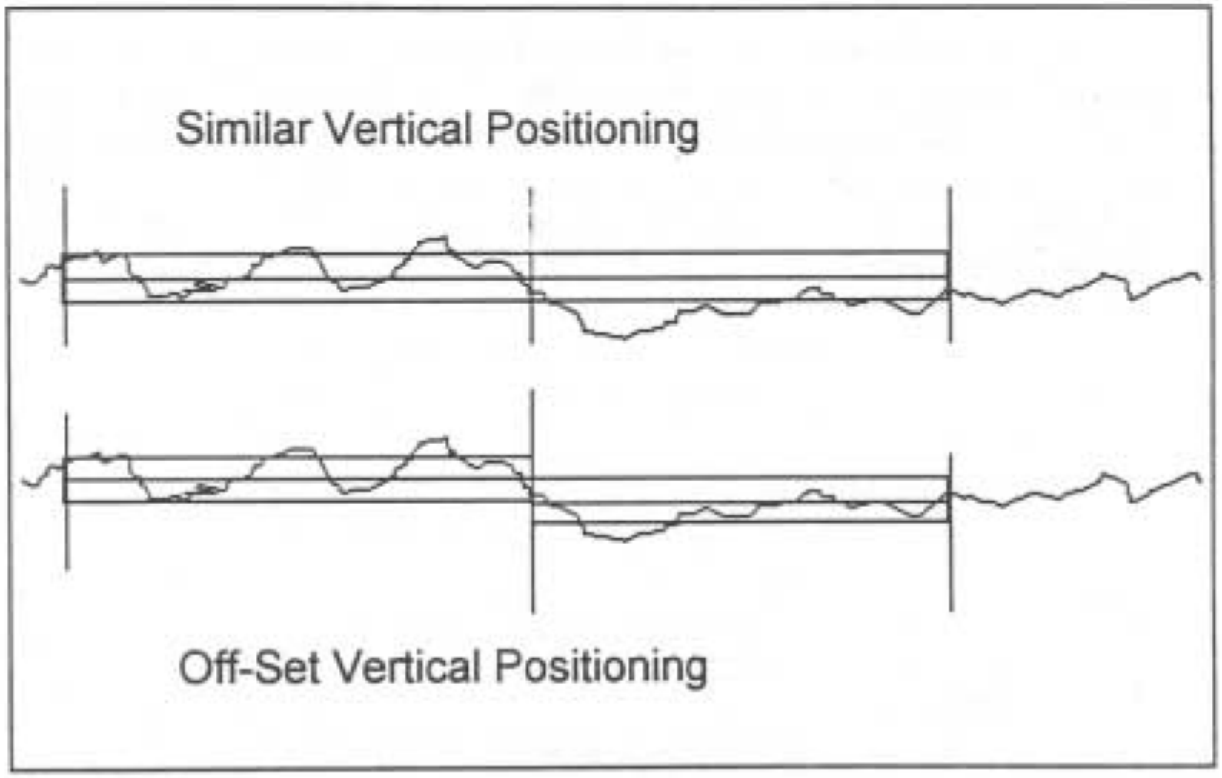


Figura 17. Ejemplos de la posición de la banda de borrado cuando se mueve entre dos secciones de perfil.

El uso de la primera técnica requiere considerablemente más juicio y destreza, ya que las decisiones que se tomen de la posición de la banda de borrado pueden afectar su posición en el futuro en secciones que puedan ser evaluadas. El segundo método requiere menor experiencia y permite más libertad en la determinación de la mejor adecuación de los datos con la banda de borrado. Ambas propuestas son usadas actualmente en la industria y pueden afectar los resultados significativamente. El Método de Prueba de California 526 no requiere alineamiento vertical entre secciones adyacentes. Se desconoce el origen del método que no requiere de alineación vertical entre secciones adyacentes; sin embargo, sea resultado probablemente de la necesidad de evaluar recorridos que inician al final de una sección y el final dentro de la siguiente. Aunque el procedimiento de prueba señala que el recorrido solo debe ser contado una ocasión, si dos proyectos son usados con diferente posicionamiento vertical, los recorridos puede que no sean contados del todo, simplemente porque se encuentran localizados entre secciones. Es posible que un salto significativo no sea detectado o que sea calculado en una sección, lo que hace que este cerca del límite de la especificación y hacer que se sobrepasen las especificaciones.

Una banda de borrado o tolerancia típica es de 5.08 mm de ancho, aunque algunas agencias han usado 2.54 mm de ancho de banda, mientras que otras usan cero de banda de borrado. En 1990 en Kansas experimentaron un problema con rugosidades de longitudes de onda corta. Un proyecto mostró longitudes de onda de 2.5 ciclos/m de aproximadamente 5.08 mm de amplitud. Aunque el perfilógrafo determinó que la

rugosidad del pavimento cumple las especificaciones, la calidad del viaje en el pavimento fue mala. Como resultado de este problema, el departamento de transporte de Kansas eliminó la banda de borrado y desarrolló especificaciones usando el concepto de banda de borrado cero. La evaluación de los trazos de un perfilógrafo de la compañía Rainhart se desarrolla de manera similar a los trazos del perfil obtenidos con el perfilógrafo tipo California, excepto que la banda de borrado de 2.54 mm es usada en lugar de una de 5.08 mm, aunque actualmente, en los perfilógrafos computarizados se hace uso de los tres tipos señalados anteriormente.

Determinación del Índice de Perfil

Los recorridos que se extienden en altura más de 0.8 mm por arriba de la banda de borrado en una distancia horizontal menor de 2 mm (0.61 m en el pavimento) son grabados en el perfil y redondeados cerca de 1.3 mm. La suma de las alturas registradas dentro de un segmento dado es el índice de perfil para ese segmento. El índice de perfil se expresa en términos de mm/km o cómo en el caso de la normativa de México en cm/km.

Los recorridos son evaluados contra cinco líneas paralelas plasmadas en ambos lados de la banda de borrado a intervalos de 2.54 mm. La relación entre las líneas marcadas en la banda de borrado y el trazo son determinadas a simple vista por el ojo. Debe hacerse notar que un lápiz de 5 mm es aproximadamente 0.5 mm de ancho. Una pluma de punto medio y una lápiz de filo medio están entre 0.4 y 5.08 mm en ancho. También debe notarse que la pluma de grabación del perfilógrafo no siempre produce una línea de ancho constante. Por lo tanto, cuando se intenta hacer una medición a centenares de milímetros, la agudeza visual es desafiada. Como se describió previamente, los recorridos que se extienden 0.8 mm más allá de la banda de borrado son grabados como rugosidad y redondeados cerca de 1.3 mm. El ancho de un lápiz puede interpretarse para que sea 0.0 mm y otro de 1.3 mm siempre que el perfil real sea el mismo. No existe previsión para las desviaciones actuales grabadas como 0.8 y 10 mm. La Figura 18 muestra un ejemplo de cómo el IP es calculado a partir del trazo de un perfilógrafo en sus unidades originales que son las inglesas.

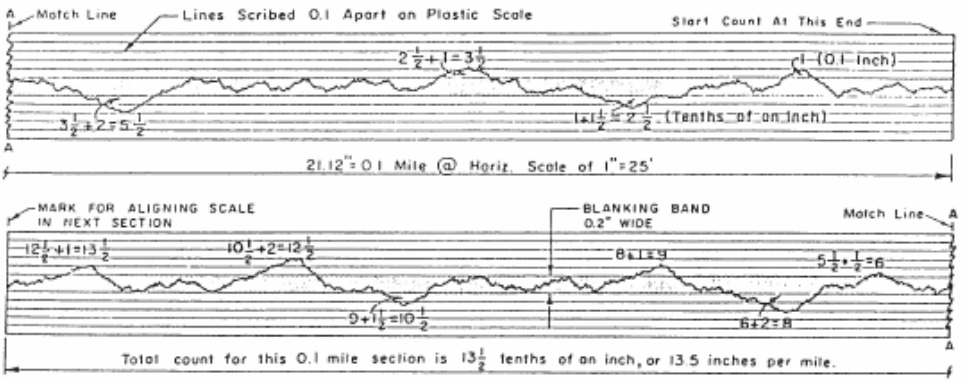


Figura 18. Ejemplo que muestra el método de determinación del IP a partir del trazo de un perfilógrafo.

CAPÍTULO 4
EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

Introducción

Una variedad de equipos han sido desarrollados a lo largo de los años para medir la rugosidad de los pavimentos. La medición de la rugosidad de los caminos fue desarrollada para monitorear la condición de la red carretera para ser usada en los Pavement Management System (PMS) y para evaluar la calidad del viaje de pavimentos recientemente construidos o rehabilitados. Los datos obtenidos de los perfilómetros inerciales pueden también usarse par hacer un diagnóstico de sitios específicos y determinar las correcciones adecuadas, además de estudiar la condición de sitios determinados para investigación.

El equipo que se ha usado para medir la rugosidad de los pavimentos puede dividirse en las siguientes cinco categorías:

1. Sistemas de Medición de la Rugosidad del Camino del Tipo Respuesta.
2. Perfilómetros Inerciales de Alta Velocidad.
3. Perfilógrafos.
4. Perfilómetros Ligeros.
5. Dispositivos Manuales.

Hasta mitad de la década de los 80's, muchas agencias de carreteras usaron algunos RTRRMS para medir la rugosidad de su red de pavimentos. Estos dispositivos median la respuesta del vehículo al camino y típicamente tenían un transductor que acumulaba el movimiento relativo entre el eje y la estructura del vehículo. Una variedad de RTRRMS han sido desarrollados a lo largo de los años. Algunos de estos populares dispositivos de tipo respuesta son el rugosimetro BPR, el medidor PCA y el medidor del camino Mays. Con la llegada de los perfilómetros inerciales el uso de los RTRRMS ha disminuido.

El perfilamiento del camino en alta velocidad es una tecnología que inicio en la década de los 60's cuando Elson Spangler y William Kelly desarrollaron un perfilómetro para el Laboratorio de Investigación de la General Motors.[27]El número de agencias en los Estados Unidos que adoptaron los perfilómetros de alta velocidad para recabar los datos de rugosidad en su red de carreteras mostró un gran incremento en la década de los 90's. Los perfilómetros inerciales obtienen los datos del perfil del pavimento a las velocidades de operación de las carreteras y generan el perfil real de un camino.

Los perfilógrafos han sido ampliamente usados para evaluar la uniformidad de la construcción de pavimentos nuevos como de sobrecarpetas. Muchas agencias de carreteras usan el índice de perfil (IP) que se obtiene a partir de la medición del trazo de un perfil por un perfilógrafo, como la base para la aceptación de pavimentos nuevos

como de sobrecarpetas. Estímulos y sanciones para nuevas construcciones de pavimentos también se basaban en el valor del IP.

Durante años recientes, se ha incrementado el uso de los perfilómetros ligeros para evaluar la condición de nuevas construcciones de pavimentos. Los perfilómetros ligeros obtienen el perfil real de una carretera. Los datos del perfil pueden ser usados para simular un perfilógrafo sobre la sección del pavimento y generar el IP para la carretera y también identificar los sitios de picos. Los datos del perfil también pueden ser usados para calcular los índices de rugosidad del pavimento como pueden ser el IRI y el RN.

Dispositivos manuales como el Dipstick, perfilador seguidor y estadal y nivel, son generalmente usados para recabar los datos del perfil en orden en una sección para verificar los datos obtenidos por los perfilómetros del camino. El procedimiento general, que es usado actualmente para verificar la salida de los perfilómetros del camino, es usar los dispositivos manuales para obtener los datos del perfil en las secciones de prueba, posteriormente calcular un índice de rugosidad a partir de los datos, como puede ser el IRI y comparar los valores que se obtuvieron de los perfilómetros.

Response Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS)

Tipos de equipos

Los RTRRMS miden la respuesta del vehículo o de un remolque, usando un transductor, hacia el camino. Automóviles o remolques estandarizados habían sido usados para alojar los dispositivos de tipo respuesta. Los sistemas acoplados al vehículo acumulaban el movimiento vertical del eje trasero del automóvil con respecto a su carrocería, de igual manera el sistema montado en un remolque acumulaba el movimiento del remolque respecto a la carrocería. Uno de los primeros dispositivos de tipo respuesta fue rugosimetro del BPR. Posteriormente, fueron desarrollados una variedad de equipos de tipo respuesta como son el Medidor del Camino Cox, el Medidor del Camino PCA y el Medidor Mays.

Estos dispositivos median las carreteras a velocidades superiores a 80 KPH. La ASTM desarrolló la norma Estándar E 1082, *Método de Prueba Estándar para la Medición de la Respuesta Vehicular al Recorrido de una Superficie Rugosa*, que específica los procedimientos que se deben de seguir para la medición de la rugosidad con un sistema de tipo respuesta acoplado al vehiculo. La Norma Estándar ASTM E 1215, *Especificaciones Estándar para Remolques Usados para la Medición de la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de Carreteras*, especifican el estándar y los procedimientos que se deben de usar para la medición de la rugosidad con un sistema de medición de la rugosidad acoplado a un remolque.

Aunque se tenían problemas con los datos tomados de los sistemas de tipo respuesta, relacionados con la reproducibilidad y portabilidad, la única razón por la que se habían vuelto tan populares en el pasado, era que proporcionaban una manera económica de obtener la rugosidad de las carreteras. Las medidas que producen han sido vistas por ingenieros, que combinados con su experiencia, los usan para determinar la calidad del pavimento de diferentes maneras.

Rugosimetro del Bureau of Public Roads (BPR)

El rugosimetro del BPR fue el primero en introducir el concepto en 1925 y ha sido reconocido como el mejor dispositivo de rugosidad de alta velocidad disponible en su época. En la
Figura 19 [28] y Figura 20 se muestra un esquema del rugosimetro BPR. El rugosimetro BPR consiste de un remolque con una rueda que es arrastrado por un carro o una camioneta. La llanta acoplada en el remolque esta soportada por resortes de lámina que se encuentran en la carrocería del remolque.

Las variaciones en la superficie del pavimento causan que la rueda se mueva respecto a la estructura del remolque. Estos movimientos verticales son acumulados por un integrador numérico, proporcionando la rugosidad del pavimento en unidades de pulgadas/milla. Este dispositivo fue operado a velocidades de prueba de 32 KPH para el registro de datos.

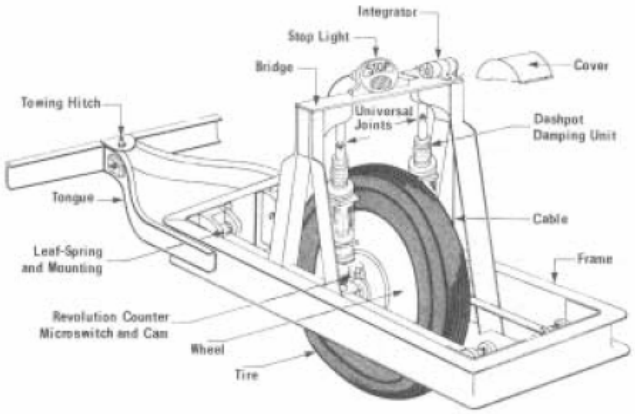


Figura 19. Rugosimetro del BPR.

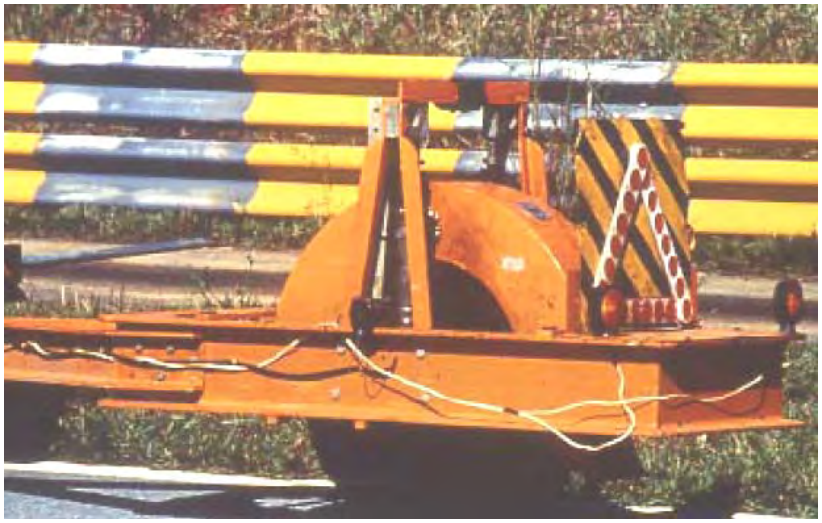


Figura 20. Rugosimetro del BPR.

Después de un tiempo de prueba se observo que las mediciones obtenidas por este equipo eran susceptibles a la temperatura, a las condiciones de los rodamientos y a los componentes mecánicos. También tenía un efecto de frecuencia resonante que producía resultados incorrectos. Debido a la velocidad tan baja de operación de éste equipo, diversas modificaciones fueron hechas para incrementar la velocidad de operación; sin embargo, las características básicas de operación se alteraron en alta velocidad y su uso gradualmente se redujo en el tiempo.

Medidor Mays

El medidor Mays fue manufacturado comercialmente por la Compañía Rainhart de Austin, Texas, en los Estados Unidos. El medidor Mays fue ampliamente usado para medir la rugosidad del pavimento de la década de los 60's a principios de la década de los 80's, aunque en México se uso para definir la rugosidad de su red carretera hasta el 2005. Este equipo fue acoplado a un carro ordinario de pasajeros o a una camioneta. La Figura 21 [21] muestra un esquema del medidor Mays.

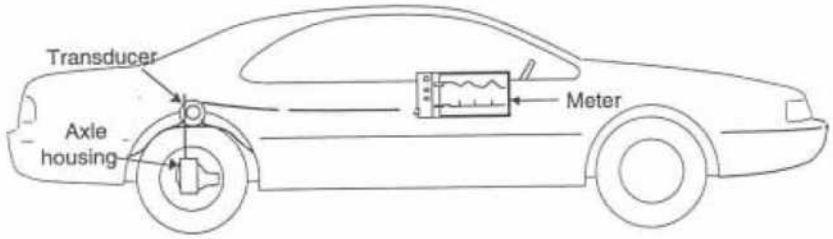


Figura 21. Medidor Mays acoplado a un carro.

El medidor Mays media los movimientos de las suspensión del vehiculo por el registro del movimiento relativo entre el eje y la carrocería. La medida de rugosidad que era obtenida por este equipo se da en pulgadas de suspensión acumulada, dividida por la distancia recorrida y se reporta en unidades de pulgadas/milla o metro/kilómetro. La medida de la respuesta vehicular del medidor Mays es muy similar su contenido de frecuencia a las aceleraciones de la carrocería del vehículo, por lo que su correlación con la vibración del recorrido es muy alta.

Los componentes principales del medidor Mays son el transductor, el registrador de la condición del pavimento y el instrumento que mide la distancia. El transductor rotatorio convierte el movimiento de un vástago a una señal eléctrica. El instrumento que mide la distancia es un odómetro electrónico. El registrador de la condición del pavimento es un microprocesador, que acepta la entrada del transductor, del instrumento que mide la distancia y de la transformación de estas señales a una salida, que comúnmente se encuentra en la forma de desplazamientos verticales acumulados en una distancia dada. Un esquema definido de los equipos que utiliza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México se observa en la Figura 22.

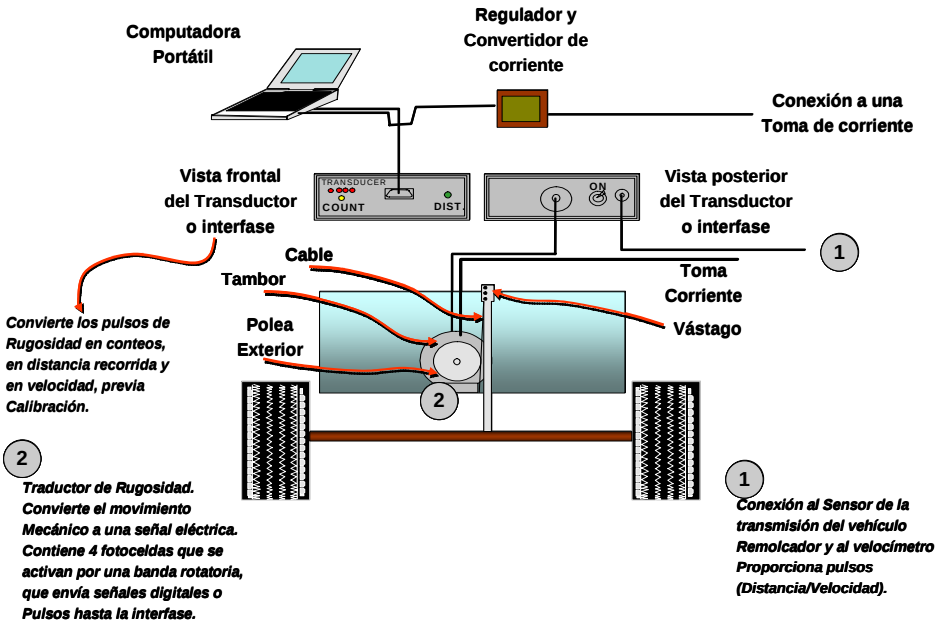


Figura 22. Esquema de los componentes del medidor Mays.

La evaluación con el medidor Mays puede llevarse acabo de 32 a 96 KPH, en México se lleva a cabo de 30 a 80 KPH; sin embargo, es conveniente controlar la velocidad de prueba, debido a que ésta afecta la salida de información del sistema. Otros factores que afectan las salidas de información son la presión de inflado de los neumáticos, la alineación de las llantas del remolque, las características del sistema de suspensión y los cambios de peso en el vehiculo. Todos estos factores son función de las características del vehiculo anfitrión. Por lo tanto, cuando las propiedades del vehiculo anfitrión variaban o eran cambiadas, el Número de Viaje del medidor Mays cambiaba de igual manera. Estos resultados eran de suma importancia en le exactitud y capacidad de repetición, cuando este equipo se usaba para probar y controlar la uniformidad inicial del pavimento. En la década de los 80's, se concluyó que en la mayoría de las funciones más críticas de las secciones evaluadas en caminos individuales (especialmente las relacionadas con superficies uniformes que representaban a construcciones de nuevos pavimentos), el error aleatorio restante limita el uso completo de los sistemas de tipo respuesta, incluido el medidor Mays.[23]

La calibración y correlación de este sistema debe ser llevada frecuentemente para verificar su exactitud. Los métodos estándar efectuar la verificación fueron elaborados para la FHWA por el Instituto de Tecnología y Estándar de los Estados Unidos en 1988 y posteriormente incorporadas a la normatividad de la ASTM.

Medidor del camino PCA

El medidor del camino PCA fue desarrollado por la Asociación del Cemento Pórtland en 1965. Este dispositivo mide el numero y la amplitud de la desviación vertical entre la carrocería del vehiculo y el centro del eje trasero. Las desviaciones son registradas en

incrementos de 1/8 de pulgada superiores al recorrido máximo de ± 1 ½ pulgadas de la posición neutral. El dispositivo se uso para tomar lecturas a velocidad de 80 KPH.

Fue usado inicialmente con sistemas de índices de pavimentos a principios de la década de los 80's y como parte de las especificaciones de uniformidad. Proporciona el nivel de rugosidad para una sección en términos de conteos por milla; sin embargo, no tiene la capacidad de distinguir donde fue localizada la rugosidad en una sección. Los resultados pueden verse afectados por la colocación de los pesos (equipaje y pasajeros) en el vehiculo, presión de llantas, vientos cruzados y otros factores.

Variaciones en las características del diseño fueron incorporadas en el dispositivo original y, en algunos casos, estos nuevos instrumentos consiguieron su propia identidad, como por ejemplo el medidor del camino Cox.

Desventajas de los RTRRMS

Los RTRRMS tienen características que afectan la precisión del registro de datos. Los siguientes incisos son algunos de los problemas y desventajas asociadas con estos dispositivos de tipo respuesta.

1. *Las características del sistema mecánico afectan las mediciones*: Las mediciones obtenidas de los sistemas de tipo respuesta están influenciadas por las características del vehiculo como son el sistema de suspensión, condiciones de las llantas, presión de inflado de las llantas y el peso del vehiculo. Si las características del vehiculo cambian en el tiempo, la respuesta que se mida puede variar. Esto incrementa la preocupación relacionada con la precisión y repetibilidad de los RTRRMS. Como las mediciones de la rugosidad no son estables con el tiempo, las mediciones obtenidas por un RTRRMS no pueden compararse con confianza a éstas previamente hechas.

2. *Las mediciones de rugosidad no son transportables*: Las mediciones obtenidas por un RTRRMS raramente son reproducibles por otro dispositivo. La salida obtenida de un RTRRMS que se instala en un vehículo en particular pueden ser diferentes de las salidas obtenidas del mismo RTRRMS que se instale en otro vehiculo. Aunque el vehiculo se ha estandarizado (por ejemplo, el RTRRMS se ha instalado en un vehiculo de la misma fabricación), hay diferencias que permanecen entre los vehículos que de no verse se podría pensar que son idénticos. Estas diferencias se deben a las variaciones en el sistema de suspensión, presión de inflado y condiciones de los neumáticos entre los vehículos.

3. *La velocidad del recorrido afecta las mediciones*: La velocidad del recorrido afecta la respuesta del sistema. Si la misma sección es medida por el mismo dispositivo a dos diferentes velocidades, las salidas que se obtengan pueden ser diferentes. Cuando las mediciones de la rugosidad se hacen con sistemas de tipo respuesta, se usa una velocidad estándar para obtener las medidas. Sin embargo, el vehiculo no siempre podrá mantener la velocidad estandarizada debido a las condiciones existentes del tráfico.

4. *Falta de una escala de rugosidad estándar:* La mayor desventaja del uso de los datos obtenidos de un sistema de tipo respuesta ha sido la falta de una escala de rugosidad estándar. La carencia de una medida estándar no era vista inicialmente como un problema serio por muchos de los usuarios de los instrumentos de rugosidad. Los datos de rugosidad para una ciudad, país o estado pueden tener unidades arbitrarias, que sean constantes internamente tanto en longitud como en la base de datos. Si las características del vehiculo no cambian durante el periodo en el cual fueron obtenidas las mediciones de rugosidad, las medidas de rugosidad pueden ser comparadas. Sin embargo, si las características del vehiculo han cambiado a partir de años anteriores, las mediciones de rugosidad obtenidas durante años recientes no pueden compararse con las obtenidas previamente.

5. *No puede hacerse la comparación entre unidades diferentes:* Las mediciones de rugosidad obtenidas para una red de carreteras usando diferentes RTRRMS no puede ser comparable. Esta situación puede surgir si se ha usado diferentes RTRRMS para medir la rugosidad de diferentes partes de la red carretera. Un método para superar este problema fue calibrar los RRTRRMS a una medición de rugosidad estándar usando diversas secciones de prueba. Esto involucraba la selección de varias secciones de prueba que tuvieran niveles de rugosidad variados de uniformes a muy rugosos. Posteriormente, el perfil longitudinal de las secciones de prueba se media usando un perfilómetro de tipo inercia o un dispositivo manual y se calculaba un índice de rugosidad a partir de los datos del perfil. En seguida, se desarrollaba un análisis de regresión entre las salidas obtenidas de cada dispositivo de tipo respuesta y el índice de rugosidad de las secciones de prueba. La ecuación de regresión obtenida para cada dispositivo proporciona un método para convertir los valores de rugosidad medidos por los dispositivos de tipo respuesta a una escala de rugosidad estándar. Como los valores de rugosidad medidos por diferentes dispositivos pueden convertirse a través de las ecuaciones de regresión a una escala de rugosidad estándar, este procedimiento proporciona cierta confianza en la obtención de mediciones de rugosidad semejantes para una red de pavimentos que sea medida por diferentes dispositivos de tipo respuesta.

6. *Incapacidad para localizar características de la rugosidad*: Como los dispositivos de tipo respuesta graban solamente la respuesta del vehiculo, ninguna información puede ser obtenida de los datos que se relacione a la localización de un sitio rugoso en el pavimento.

Perfilómetros inerciales de alta velocidad

Los perfilómetros de inercia graban el perfil real de una superficie de pavimento. Los perfilómetros de inercia recolectan los datos del perfil en los pavimentos a la velocidad de operación de la carretera. El primer perfilómetro de inercia de alta velocidad, como ya se comentó, fue desarrollado por Elson Espangler y William Kelly para los Laboratorios de Investigación de la General Motors. Inicialmente los perfilómetros de inercia median la altura relativa del vehiculo hacia el suelo usando un instrumento

seguidor de ruedas que se atravesaba a lo largo de la rodada. El seguidor de ruedas era frágil y requería de ser probado a bajas velocidades para evitar que rebotara. Todos los perfilómetros que se venden hoy en día usan sensores sin contacto que sustituyen a las ruedas seguidoras.

Los principales componentes de un perfilómetro de inercia son:

- Sensores de altura.
- Acelerómetros.
- Sistema de medición de distancia.
- Sistema de Cómputo para el cálculo del perfil del camino.

Los sensores de altura graban la altura del vehiculo a la superficie del pavimento. Los acelerómetros que se colocan arriba de los sensores de altura graban la aceleración vertical del vehiculo. Los datos obtenidos de los acelerómetros son usados para determinar la altura relativa del vehiculo hacia un marco de referencia inercial. El sistema de medición de distancia contabiliza la distancia respecto a un punto inicial de referencia. Usando los datos almacenados por el sistema de medición de distancia, el sensor de altura y el acelerómetro, un programa de cómputo calcula el perfil de la superficie del pavimento. Los tipos de sensores de altura sin contacto que son usados en los perfilómetros hoy en día pueden ser láser, ultrasónicos, ópticos o infrarrojos. Los sensores ultrasónicos fueron los más comunes que se usaron en la década de los 80's. Sin embargo, debido a los problemas con este tipo de sensores, su uso fue abandonado con el paso de los años. Actualmente los sensores láser son los más comunes que se usan en los perfilómetros.

El primer perfilómetro inercial fue comercialmente manufacturado por la Compañía de Ingeniería K. J. Law. El Departamento de Transporte del Sur de Dakota en los Estados Unidos desarrolló un sistema de perfilamiento en 1984.[1] Este sistema de perfilamiento fue colocado en una pequeña camioneta que usaba sensores ultrasónicos, mismo que fue adquirido por diversas agencias de carreteras. Actualmente existe una gran variedad de perfilómetros de inercia, donde algunas de las compañías que los fabrican son: Dynatest, Internacional Cybernetics Company (ICC), Infrastructure Management Services (IMS), K. J. Law, Pathway y Roadware. Muchos de estos sistemas incluyen un sensor central, cuya elevación es usada en conjunto con las elevaciones medidas a lo largo de las rodadas para calcular la profundidad de rodada. El procedimiento que se usa para calcular la profundidad de rodada a partir de un sistema de perfilamiento con tres sensores se muestra en la Figura 23.

Algunos de los equipos fabricados ofrecen un sistema de perfilamiento de cinco sensores para calcular la profundidad de rodada. En estos sistemas, dos sensores adicionales son colocados fuera de las rodadas izquierda y derecha. Muchos de los equipos fabricados para medir el perfil pueden diseñarse con un sistema de información que pueda recabar una variedad de información adicional a los datos del perfil. Algunos de estos sistemas de perfilamiento son equipados con cámaras de video que pueden grabar diversas perspectivas del camino, además estos videos pueden ser usados para

evaluar la condición del camino, del hombro, o bien algunas otras señales de las características del camino.

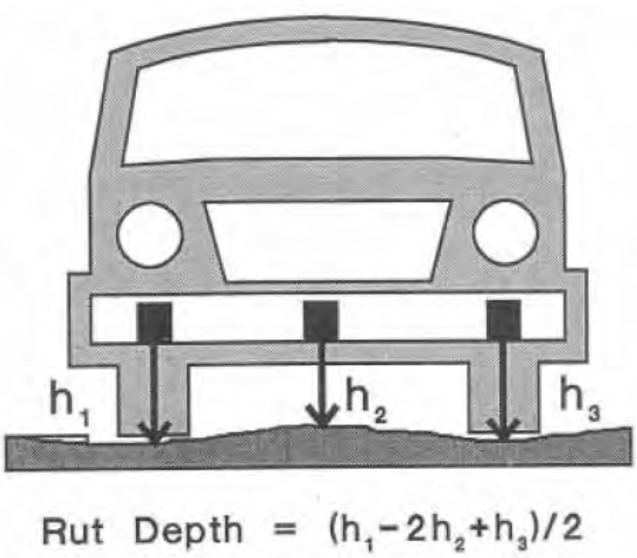


Figura 23. Cálculo de la profundidad de rodada a partir de un sistema de perfilamiento de tres sensores.

Dynatest

El Dynatest Road Surface Profiler (RSP) que se muestra en la
Figura **24** desarrolla mediciones continuas a las velocidades de operación de las carreteras del perfil longitudinal y transversal, incluida la evaluación en tiempo real de la rugosidad y de la profundidad de rodera. Este producto se encuentra disponible en varios niveles de sofisticación, que va de 21 láseres colocados en la parte a superior o menos en una versión en línea, hasta una versión de rodada individual, para la evaluación del perfil longitudinal y el IRI. La unidad transductora se localiza en la parte frontal del vehiculo y puede soportar 21 sensores láser y de 1 a 3 acelerómetros.

Figura 24. Dynatest Road Surface Profiler.

International Cybernetics Company (ICC)

La Compañía ICC fábrica una variedad de perfilómetros de inercia. Los siguientes son los modelos típicos que se encuentran disponibles en el mercado. La Figura 25, muestra uno de los modelos disponibles actualmente en el mercado.

Modelo MDR 4084: Equipado con tres sensores de altura y un acelerómetro. Obtiene el perfil y el IRI de una rodada, además del promedio de profundidad de rodera en las dos rodadas.

Modelo MDR 4085: Equipado con dos acelerómetros y tres sensores de altura. Obtiene el perfil y el IRI a lo largo de las dos rodadas y también el promedio de profundidad de rodera de las dos rodadas.

Modelo MDR 4087: Equipado con dos acelerómetros y cinco sensores de altura. Obtiene el perfil y el IRI a lo largo de las dos rodadas, además calcula la profundidad de rodera usando los datos de los cinco sensores de altura.

Figura 25. Perfilómetro láser ICC.

Infrastructure Management Services (IMS)

El perfilómetro láser RST de la compañía Infrastructure Management Services es un sistema de evaluación de carreteras desarrollado por la Swedish National Road Administration (SNRA). Estos vehículos pueden equiparse con cámaras para evaluar la condición del pavimento, así como para tener una perspectiva visual del camino. La Figura **26** muestra una versión del sistema láser RST.

Figura 26. Perilómetro láser RST.

K. J. Law Engineers

K. J. Law Engineers actualmente fabrica dos dispositivos perfiladores de inercia llamados Modelo T6500 y T6600. Ambos dispositivos están equipados con sensores infrarrojos de altura. El perfilómetro Modelo K. J. Law T6600 fue usado para recabar los datos del perfil para el programa LTPP en la década de los 90's. En el inicio del programa LTPP, de 1989 a 1996, se desarrolló el perfilómetro Modelo K. J. Law DNC 690 para la recolección de los datos del perfil en las secciones de prueba.

El perfilómetro DNC 690 esta equipado con ocho sensores ópticos de altura, los cuales están montados en la carrocería del vehiculo entre el eje trasero y el frente. Una cubierta protege a los sensores de altura para prevenir las lecturas que se vean afectadas por la luz solar. Los problemas más comunes con estos perfilómetros, es la incapacidad de los sensores para recabar datos en pavimentos con oscuridad y contaminación de los datos del perfil por la luz solar. La
Figura **27** muestra el perfilómetro modelo de K. J. Law. DNC 690.

En los perfilómetros T6600, los sensores de altura se encuentra ubicados en una barra que se coloca en la parte frontal del vehiculo. Este dispositivo puede recabar datos a intervalos de 25 mm. Los sensores infrarrojos de altura en este dispositivo tienen una zona de impresión que abarca un área de 6 mm X 37 mm, con la dimensión de 37 mm en sentido perpendicular a la dirección de recorrido. La
Figura **28** muestra el perfilómetro modelo K. J. Law. T6600.

Figura 27. Perfilómetro K. J. Law DNC 690.

Figura 28. Perfilómetro K. J. Law T6600.

Pathway

Los perfilómetros fabricados por la compañía Pathway han sido usados por diversas agencias estatales en los Estados Unidos para obtener los datos del perfil, así como videos que son usados para evaluar la condición del pavimento. La Figura **29** muestra un perfilómetro de éste tipo.

Figura 29. Perfilómetro Pathway.

Roadware

La compañía ofrece una variedad de dispositivos para recabar datos del perfil del camino y de la condición del pavimento, la Figura 30 muestra un perfilómetro láser SDP fabricado por Roadwere.

Figura 30. Perfilómetro láser SDP Roadware.

Perfilógrafos

Numerosos modelos de perfilógrafos han sido usados desde 1900. Un perfilógrafo consiste de una viga rígida o estructura con un sistema de ruedas de soporte al inicio y al final, y al centro una rueda. Las ruedas de soporte en los extremos establecen una referencia a partir de la cuál las desviaciones de la rueda central pueden ser evaluadas. La rueda central se conecta a una impresora de carta de tira o a una computadora que registra el movimiento de la rueda central a partir de la referencia establecida. Durante la evaluación de la superficie de una carretera el perfilógrafo es empujado a lo largo del pavimento a una velocidad no mayor de 5 KPH.

Los perfilógrafos mecánicos graban los datos en una impresora de carta de tira. La salida de la impresora de carta de tira tiene que ser analizada en orden para obtener los resultados de uniformidad. La evaluación de las salidas de la impresora de carta de tira puede hacerse de manera manual o electrónica. En el método manual, un técnico evalúa las salidas del perfilógrafo para determinar el resultado de uniformidad y la localización de saltos en la superficie. En el método electrónico, las salidas de la carta de tira son digitalizadas y la reducción de los datos se desarrolla por un programa de cómputo y los resultados pueden ser impresos, tal como se aprecia en la Figura 31.

Figura 31. Sistema electrónico para analizar los resultados de un perfilógrafo.

A mediados de la década de los 80's, James Cox and Sons introdujo al mercado un perfilógrafo computarizado que podía analizar los datos usando programas de computo y generar el Índice de Perfil de una sección, además de señalar los puntos altos en el perfil. El perfilógrafo computarizado elimina la necesidad de analizar el perfil en la oficina después de hacer las evaluaciones de campo. El perfilógrafo computarizado es capaz de desarrollar la reducción del trazo en campo inmediatamente después de que la prueba ha sido llevada a cabo. Esto incrementa significativamente el rendimiento y reduce la variación en la reducción del trazo que se tenía al ser interpretado de la misma manera.

Los perfilógrafos que actualmente se encuentran en uso pueden ser clasificados en perfilógrafo tipo California o Rainhart, basados en la configuración de ruedas de

soporte. Conviene señalar que menos del 10% de los perfilógrafos en uso son del tipo Rainhart. De los perfilógrafos del tipo California al menos dos terceras partes son de estructura armada, mientras que una tercera son perfilógrafos en viga del tipo Ames.[26]

El perfilógrafo se utiliza para medir el perfil longitudinal de un pavimento. Su principal uso esta relacionado con el control de la construcción de pavimentos. Los perfilógrafos se han utilizado con éxito para el control de calidad de la construcción en miles de kilómetros de pavimentos en las últimas décadas.

Con un gran numero de agencias de carreteras usando los perfilógrafos para medir la uniformidad del pavimento, el índice del perfil se ha convertido en un índice estándar para la medida de la regularidad en especificaciones de construcción.

Los perfilógrafos calculan el valor del índice de perfil en unidades de mm/km y pueden usarse para definir el Índice de Rugosidad Internacional a través de la calibración de los equipos de tipo respuesta o láser, correlacionando los datos que arroja el perfilógrafo con el método de estadal y nivel (método de tipo clase I) [4] y con la respuesta o resultados de los equipos, de tal forma que se obtenga la relación entre estos dos parámetros de medición superficial (IRI-IP).

Perfilógrafo de California

El perfilógrafo de California ha estado en uso por más de medio siglo. El primer perfilógrafo de California fue construido en 1940 por la División de Investigación del Departamento de Carreteras de California. A partir de entonces, ha tenido variaciones en longitud de 4 a 9.9 m, de igual manera en el numerote ruedas que van de 4 hasta en algunos casos 16. El perfilógrafo de 12 ruedas que es de uso común hoy en día fue construido inicialmente en 1961. La Figura 32 muestra un perfilógrafo de California de 12 ruedas.

Figura 32. Perfilógrafo de California de estructura armada.

El perfilógrafo consiste en segmentos estructurales de aluminio, sistema de ruedas de ensamble, mecanismo de dirección y de grabación. La estructura puede ser desensamblada para transportarse en una camioneta o en un camión. El tiempo de ensamble total del equipo se ha reportado que es aproximadamente de 10 minutos. Una vista superior del perfilógrafo se muestra en la Figura 33.

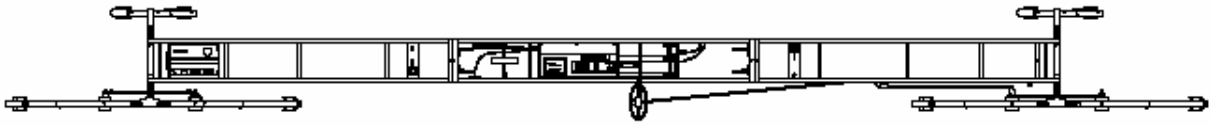


Figura 33. Vista superior del perfilógrafo de California.

La longitud del perfilógrafo es de 7.6 m y esta soportada su estructura por dos sistemas de ruedas que se colocan en los extremos. Cada sistema de ruedas consiste de seis ruedas, cuatro de un lado de le estructura y dos del otro lado. Como se comento, el perfilógrafo es empujado en una evaluación superficial a lo largo del pavimento por un operador que guía el equipo usando un sistema de dirección que se ubica al centro del perfilógrafo. El trazo del perfil es elaborado por un programa de cómputo que lo manda a impresión inmediatamente después de la evaluación con una escala horizontal de 1:300 y la vertical de 1:1. Un ejemplo del trazo del perfil se muestra en la Figura 34.

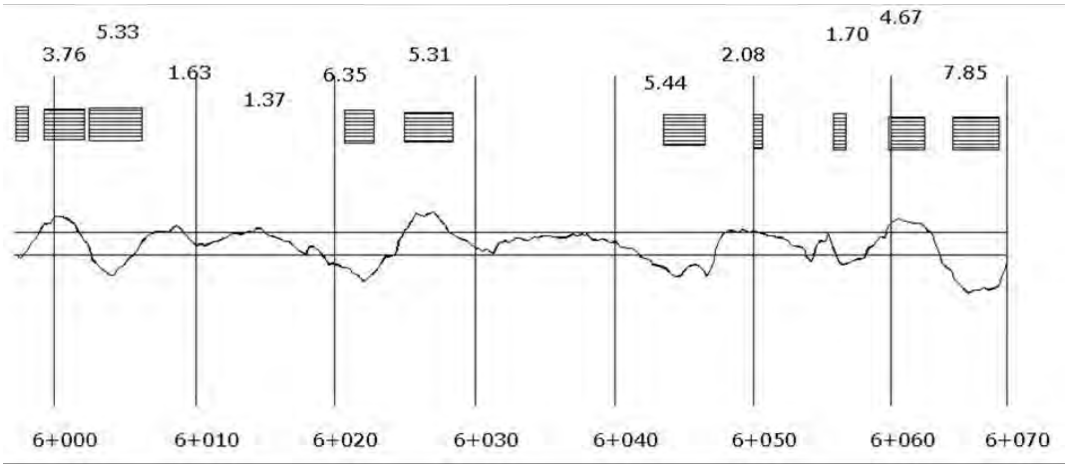


Figura 34. Reporte generado por el perfilógrafo California.

El perfilógrafo de California es fabricado comercialmente por las compañías: James Cox and Sons, Mc Cracken Concrete Pipe Machinary y Soiltest. James Cox and Sons de California ha fabricado los perfilógrafos desde 1960 y a mediados de los 80's desarrollaron los perfilógrafos computarizados, mientras que Mc Cracken inicio en 1984 y fabricó modelos computarizados en 1990.

Perfilógrafo Ames

El perfilógrafo Ames fabricado por la compañía Ames fue diseñado para producir el mismo trazo de perfil que el perfilógrafo tipo California, pero cuya construcción básica es considerablemente deferente. En la Figura 35 se muestra un perfilógrafo Ames. A diferencia del perfilógrafo de California de 7.6 m de longitud, la porción longitudinal del perfilógrafo Ames esta constituida por una viga de aluminio; sin embargo, el ensamble de ruedas es muy similar en ambos casos, donde un conjunto de seis ruedas en ambos extremos del equipo son usados de soporte, de igual manera ambos tienen una rueda de medición al centro de la unidad. Los modelos computarizados, que usan batería en su operación, como los modelos mecánicos, son fabricados por la compañía Ames Engineering. El equipo puede desensamblarse y ser transportado en una camioneta.

Figura 35. Perfilógrafo Ames.

El operador empuja la unidad en una evaluación superficial a partir del extremo final del equipo, colocando en la misma dirección los dos sistemas de ruedas situados en los extremos. El sistema de grabación en el perfilógrafo Ames se encuentra en la parte final de la unidad. El movimiento de la rueda intermedia del equipo se transmite al sistema de grabación. Un transductor vertical ultrasónico de alta resolución es usado para medir el desplazamiento vertical de la rueda de medición central. La FHWA patrocinó un estudio en 1987 en el cuál el perfilógrafo Ames fue comparado con dos perfilógrafos de California fabricados por la compañía Mc Cracken [29], donde el trazo producido por los equipos resulto ser muy similar.

Perfilógrafo Rainhart

El perfilógrafo Rainhart fue desarrollado por la compañía Rainhart en Austin, Texas en conjunto con el Departamento de Carreteras de Texas en 1967. Sus estudios sirvieron de base para establecer los parámetros bajo los cuales el dispositivo fue diseñado y construido. La Figura 36 muestra al perfilógrafo Rainhart. El vértice de cada trípode es

ensamblado con una articulación de bola hacia el final de las estructuras menores. Las dos estructuras menores se centran pivoteando los extremos de la estructura mayor, la cuál soporta en el centro el sistema de grabación.

Figura 36. Perfilógrafo Rainhart.

La longitud aproximada del perfilógrafo Rainhart es de 7.5 m. Al igual que el perfilógrafo de California el Rainhart cuenta con 12 ruedas; sin embargo, el arreglo es diferente en ambos casos. En el perfilógrafo de Rainhart las ruedas operan en grupos de tres, dos al frente y dos en la parte posterior, que en conjunto soportan toda la estructura. Conviene señalar que cada recorrido de las ruedas es una rodada independiente distanciada a intervalos de 10 cm y se encuentran espaciadas a lo largo de los 7.5 m. La referencia que se establece por las doce ruedas cubre un área de pavimento de 7.5 m por 1.1 m de ancho. Esta es la mayor diferencia entre el perfilógrafo Rainhart y el de California.

La rueda localizada al centro del equipo se conecta a una impresora de carta de tira, la cuál graba el movimiento respecto a la referencia proporcionada por las ruedas de soporte. El trazo del perfil en el perfilógrafo Rainhart es grabado con una escala horizontal de 1:300 y la vertical de 1:1. El perfilógrafo Rainhart no puede ser desensamblado para transportarse, solamente la unidad de grabación puede ser quitada. El perfilógrafo cuenta con un enganche tipo remolque para ser transportado para lo cuál se auxilia de dos ruedas adicionales. Los perfilógrafos Rainhart son más pesados y menos manejables que los del tipo California.[30]

Perfilómetros ligeros

Los perfilómetros ligeros fueron desarrollados inicialmente para registrar el perfil de pavimentos de PCC recién colocados. El término de perfilómetro ligero es usado para referirse a los dispositivos en los cuáles el sistema de perfilamiento ha sido instalado. Estos dispositivos son vehículos ligeros tales como carros de golf o todo terreno. Los perfilómetros ligeros han ganado popularidad durante los últimos años, en los cuáles muchas agencias de carreteras han adquirido estos sistemas. El sistema de perfilamiento en el perfilómetro ligero es similar al de los perfilómetros de alta velocidad y consiste en sensores de altura, acelerómetros y sistema de medición de distancia. El peso ligero de estos dispositivos hace que sea posible obtener el perfil en el PCC fresco inmediatamente, tan pronto este disponible el pavimento para soportar el peso del

perfilómetro. El perfil grabado por estos dispositivos puede ser usado para generar un índice de la rugosidad como puede ser el IRI o usar los datos del perfil para simular el funcionamiento de un perfilógrafo y generar el IP. Los vendedores que actualmente comercializan los perfilómetros ligeros son Ames Engineering, International Cybernetics Corporation y K. J. Law Engineers.

Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA)

El Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA) fue desarrollado por la División de Tecnología y Materiales del Departamento de Transportes de Michigan en los Estados Unidos.[31] La Figura 37 siguiente muestra un dispositivo de éste tipo. Este equipo actualmente es comercializado por la compañía Ames Engineering. El sistema de perfilamiento se coloca en un cuatro ruedas John Deere que pesa aproximadamente 364 kg. El equipo puede ser operado a velocidades entre 8 y 24 KPH y graba valores del perfil del pavimento a intervalos de 75 mm.

Figura 37. Lightweight Inertial Surface Analyzer (LISA).

International Cybernetics Corporation (ICC)

La compañía International Cybernetics Corporation (ICC) fábrica perfilómetros ligeros con sistema de pista individual o doble. La Figura 38 muestra un perfilómetro ligero con sistema de pista individual, mientras que en la Figura 39 se observa uno que contempla el sistema doble. La empresa ICC reporta que el sistema de perfilamiento puede ser montado también en un vehiculo ligero todo terreno o en cualquier vehiculo que se especifique. El dispositivo puede ser equipado con foto celdas ópticas que pueden ser usadas para iniciar y terminar automáticamente la toma de datos.

Figura 38. Perfilómetro ligero configurado con pista individual.

Figura 39. Perfilómetro con sistema de pista doble.

K. J. Law Engineers

La compañía K. J. Law Engineers fabrica el perfilómetro ligero T6400, el cuál tiene un sistema de sensor individual diseñado para medir el perfil en pavimentos nuevos. El dispositivo es equipado con un codificador digital que proporciona los pulsos de distancia para calcular el perfil espacial. La Figura 40 muestra un equipo de éste tipo, actualmente la compañía se fusiono con Dynatest y el modelo tiene ahora el nombre de KJL 6400.

Figura 40. Perfilómetro ligero KJL 6400.

Dispositivos manuales

Una gran variedad de equipo operado manualmente se encuentra disponible en el mercado, pueden usarse para obtener el perfil de un pavimento. Tales métodos/dispositivos pueden ser: estadal y nivel, Dipstick y el walking profiler ARRB. La aplicación básica de estos dispositivos en la medición del perfil del camino es obtener medidas de elevación en secciones de calibración que son usadas para revisar la exactitud de los perfilómetros. El perfil en la sección de prueba obtenido de estos dispositivos puede usarse para calcular un índice de rugosidad como puede ser el IRI. Éste índice de rugosidad puede ser comparado con el índice de rugosidad obtenido por los perfilómetros de inercia para revisar las salidas del perfilómetro. Desarrollando el procedimiento en diversas secciones de prueba se tendrá un rango de valores de rugosidad que pueden ser usados para verificar que el perfilómetro esta registrando datos validos. Adicionalmente, las técnicas de filtrado pueden ser usadas para comparar los perfiles obtenidos por los dispositivos manuales y los perfilómetros.

Estadal y Nivel

El método de estadal y nivel es quizás el de mayor exactitud para la obtención de las elevaciones reales a lo largo de la superficie del pavimento. La norma estándar ASTM E 1364, *Método de Prueba para Medir la Rugosidad de un Camino por el Método de Nivel Estático*, describe los procedimientos a seguir para recabar con estadal y nivel los datos en una sección de prueba. El factor más importante cuando se obtienen datos mediante éste método es estar seguros de que la resolución que necesita el nivel se encuentra dentro de los requisitos que pide la norma ASTM. En la Figura 41 se muestra la obtención de datos con estadal y nivel.

Figura 41. Método de estadal y nivel.

Dipstick

El Dipstick es un dispositivo que se sujeta con la mano y es fabricado por la compañía FACE Technologies. La Figura 42 muestra una imagen de éste dispositivo.

Figura 42. Dipstick.

El Dipstick se pone de pie en dos apoyos y tiene uno adicional para apoyarlo cuando no esta en uso y la distancia entre los dos apoyos del equipo es ajustable. El Dipstick esta equipado con dos pantallas de cristal liquido en ambos lados que muestran la diferencia de elevación entre los dos apoyos. El operador camina con la unidad a lo largo de la rodada que se vaya a medir haciendo rotar el equipo. En cada posición del Dipstick, las lecturas que han sido grabadas se muestran en la pantalla frontal. Una opción disponible que tiene el Dipstick es usar una computadora para grabar los datos desplegados. El registro de datos del Dipstick puede usarse para obtener la elevación del perfil. Debido a la influencia del operador, la elevación del perfil obtenida del equipo tiene que ser ajustada en orden para que sea correcta la elevación del perfil. Sin embargo, ningún ajuste a los datos es necesario si son usados para calcular el IRI o el RN.

Walking Profiler

El Walking Profiler fabricado por Australian Road Research Board (ARRB) esta patentado en los Estados Unidos por Trigg Industries International. La Figura 43 muestra una imagen con un equipo de éste tipo.

Figura 43. Walking Profiler.

Este dispositivo es un sistema basado en un inclinómetro multiruedas que es empujado por un operador a la velocidad de caminado. La velocidad típica de operación es de 8 KPH. El dispositivo graba continuamente la elevación relativa de puntos sucesivos a intervalos de 241 mm y almacena las lecturas en una computadora que tiene en la parte superior. Todos los cambios incrementales son totalizados dando la altura de cada punto medido y su distancia superficial relativa al punto de inicio. Este equipo es capaz de medir elevaciones con una exactitud de ± 2 mm de altura sobre 100 m de distancia horizontal.

CAPÍTULO 5
LA NULL BAND EN EL PERFILÓGRAFO DE CALIFORNIA

Introducción

La regularidad superficial de las carreteras repercute directamente en los costos de operación del transporte, debido a que una mala calidad de los trabajos de construcción, incrementa los deterioros que se generan en la superficie y dañan a los vehículos que transitan por ellas. Por el contrario, si la calidad es excelente, no se incrementan los costos y se reducen los impactos a la estructura carretera, reduciendo las acciones de conservación del pavimento.

El uso del Perfilógrafo Longitudinal en la verificación de la regularidad superficial es una práctica común en muchos países, ya que permite conocer de forma rápida y sencilla un parámetro conocido como Índice de Perfil (IP).

Este Índice nos define la rugosidad acumulada en una cierta distancia sobre una superficie de pavimento, cuyas unidades en el Sistema Internacional son mm/km, aunque en nuestro país se usan en cm/km. Con base a éste valor se generaron especificaciones de aceptación y rechazo, bonificando los trabajos que tengan una calidad excepcional y penalizando aquellos que no cumplan.

Para la aplicación del Índice de Perfil, el resultado de la medición de este parámetro debe ser afectado por cierta tolerancia conocida como Null Band, la cuál puede adoptar valores de 0 a 10 mm.

Al analizar la medición del IP en dos tramos experimentales de la Red Federal de Carreteras, se observó que al variar la Null Band el resultado del IP en cada caso presentaba una gran diferencia en su resultado. Esto es claro, al pensar que la Null Band actúa sobre el IP cómo una tolerancia, es decir, si se considera un valor de 10 mm, en el perfilograma se toman las irregularidades que se encuentren abajo o arriba de este ancho de banda, descartándose las que se ubican dentro; por el contrario si la Null Band se reduce a 5.08 mm, aparecerán más irregularidades y el IP será más alto. Por consiguiente, si se deja la Null Band en 0.0 mm, no se tendrá ninguna tolerancia y el IP será más parecido al perfil real y su resultado será mucho mayor que en los otros dos casos.

En México, existe una normativa que regula el acabado final de una superficie de pavimento de concreto asfáltico o hidráulico mediante el uso del Perfilógrafo Longitudinal Tipo California, considerando un rango de valores de IP que van de 0 a 10 cm/km, para bonificación; de 10.1 a 14 cm/km, sin efecto; de 14.1 a 24 cm para penalización; y mayor de 24 cm/km para corrección de trabajos por mala calidad; sin embargo, no se especifica un valor de Null Band, ni tampoco en la norma ASTM E1274-03 (Método de Prueba Estándar para Medir la Rugosidad del Pavimento, utilizando un Perfilógrafo), cuya aplicación queda abierta para adoptar cualquier valor, lo cual puede ser aprovechado por el constructor para usar la mayor Null Band (10 mm) y lograr que sus trabajos sean bonificados por buena calidad.

Antecedentes

El uso de equipos de alto rendimiento en la verificación de la regularidad superficial es una práctica común en la mayoría de los países desarrollados, los cuales han incorporado a la medición de las características superficiales de los pavimentos tecnología de punta, como dispositivos ligeros que miden los perfiles sin contacto del equipo con la superficie o los que manejan en sus procesos el Video Láser.

Como parte de todo proceso, estos equipos modernos tuvieron un punto de partida, el cuál se dio a inicios de los años 60´s cuando Elson Spangler y William Kelly desarrollaron un perfilómetro de inercia en el Laboratorio de Investigación de la General Motors en los Estados Unidos de Norteamérica.[21]

Dentro de estos desarrollos tecnológicos para medir la regularidad surge el concepto de los perfilógrafos, que nacen a partir de la necesidad que observó la Federal Highway Administration (FHWA) de los Estados Unidos de Norteamérica de recibir las carreteras con una regularidad superficial adecuada y dejar de lado la idea de que los constructores tienen la buena voluntad de entregar sus trabajos con la calidad que se requiere en los proyectos. Así, de esta manera se empezó a medir la calidad de superficie terminada mediante un parámetro que es conocido como Profile Roughness Index (PRI), llamado comúnmente Índice de Perfil (IP).

Este Índice de Perfil nos define la rugosidad acumulada en una cierta distancia sobre una superficie de pavimento recorrida, cuyas unidades en el Sistema Internacional son mm/km, aunque en nuestro país se usan en cm/km. Con base en éste valor y a las investigaciones ejecutadas en tramos carreteros del Programa a Largo Plazo del Comportamiento de los Pavimentos (LTPP) iniciado en los Estados Unidos de Norteamérica en la década de los 90´s, se generaron especificaciones técnicas de aceptación y rechazo, dentro de las cuales se destaca la bonificación o premiación de aquellos trabajos que tuvieran una calidad excepcional y la penalización de aquellos que no cumplieran, como puede observarse en los factores de pago de algunas Agencias Estatales de Carreteras del citado país que se dan en la
Tabla **2** para pavimentos asfálticos.[32]

Estado	Índice	Intervalo de Prueba	Rango de Bonificación	Rango de Pago Total	Rango de Penalización	Rango de Corrección
Alabama	$PI_{5\,mm}$	160 m	< 32 mm/km	32-63 mm/km	64-160 mm/km	>160 mm/km
Arizona	$PI_{5\,mm}$	160 m	≤ 45 mm/km	46-75 mm/km	76-110 mm/km	> 110 mm/km
California	$PI_{5\,mm}$	160 m	---	≤ 80 mm/km	---	> 80 mm/km

Tabla 2. Especificaciones de Índice de Perfil para efectos de pago de pavimentos asfálticos de algunas Agencias Estatales de Carreteras de los Estados Unidos.

Los resultados de la verificación de ésta calidad repercute directamente en los costos de operación del transporte, debido a que una mala calidad de los trabajos de construcción y/o rehabilitación del pavimento, incrementará sustancialmente los deterioros que se puedan generar en la superficie y por lo tanto dañar a los vehículos que transitan por las carreteras. Por el contrario, si la calidad es excelente, no se incrementaran los costos en el transporte y se reducirán los impactos a la estructura carretera por el efecto de las cargas dinámicas de los vehículos, reduciendo las acciones de conservación del pavimento.

Para la aplicación de la evaluación del Índice de Perfil, en los Estados Unidos de Norteamérica, se consideró que el resultado de este parámetro debía ser afectado por cierta tolerancia conocida como Null Band (Banda en Blanco), la cuál puede adoptar los siguientes valores: 5.08 mm (0.2 plg), 2.04 mm (0.1 plg) y 0 mm (0 plg). [32]

En un principio se eligió como tolerancia para los trabajos de construcción el valor de 5.08 mm, sin embargo, a medida que avanzaban las investigaciones y la tecnología de carreteras, se decidió en diversas Agencias Estatales de Carreteras de aquel país no otorgar ninguna tolerancia y adoptaron el valor de cero Null Band, aumentando con ello la calidad de las obras.

Aplicación en México

En México, preocupados por la calidad de los pavimentos en las carreteras, específicamente en la rugosidad superficial, se decidió incorporar las investigaciones hechas con el Perfilógrafo Longitudinal Tipo California y generar una normativa que pudiera regular el acabado final de la superficie de las carreteras, de tal manera que ésta se mantuviera adecuadamente el tiempo suficiente para lograr que la estructura del pavimento no tuviera inmediatamente algún tipo de mantenimiento por causa de la irregularidad superficial.

La normativa SCT que señala el Índice de Perfil cómo parámetro para medir la calidad superficial fue editada en el 2000, y actualizada en 2001, 2002 y 2004 en cuatro libros, que son:

Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente N.CTR.CAR.1.04.006, Carpetas Asfálticas con Mezcla en Frío N.CTR.CAR.1.04.007, Carpetas de Concreto Hidráulico N.CTR.CAR.1.04.009, ver
Tabla **3**, y Carpetas de Granulometría Densa N.CSV.CAR.3.02.005, ver
Tabla 4.[14]

Por esas mismas fechas se adquirieron cinco equipos para evaluar y supervisar los trabajos de pavimentación que ejecutan las empresas para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); sin embargo, es aproximadamente a inicios del 2004 que se empiezan a tomar en cuenta en los contratos de obra del sector carretero.

La normativa SCT habla de verificar la calidad de la superficie mediante el uso de un perfilógrafo longitudinal en tramos específicos de 200 m o fracción en cada línea de tendido o colado en caso de carpetas de concreto hidráulico y hacer una evaluación al día, la cuál debe cumplir con un Índice de Perfil de 14 cm/km cómo máximo, para efectos de otorgar un estímulo por mejoramiento de calidad o se le aplique una sanción por incumplimiento de calidad y de 31 cm/km cómo máximo para carpetas asfálticas de granulometría densa; los valores se especifican en las Tablas 2 y 3. [14]

ÍNDICE DE PERFIL (cm/km)	**FACTORES DE ESTÍMULO O SANCIÓN (F_i)**	
4 o menos	ESTÍMULO	+ 0,05
4,1 a 5,5		+ 0,04
5,6 a 7,0		+ 0,03
7,1 a 8,5		+ 0,02
8,6 a 10,0		+ 0,01
10,1 a 14,0	0	
14,1 a 16,0	SANCIÓN	- 0,02
16,1 a 18,0		- 0,04
18,1 a 20,0		- 0,06
20,1 a 22,0		- 0,08
22,1 a 24,0		- 0,10
Mayor de 24,0	CORREGIR	

Tabla 3. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil, para las Normas: N.CTR.CAR.1.04.006.04, N.CTR.CAR.1.04.007.04 y N.CTR.CAR.1.04.009.04.

ÍNDICE DE PERFIL (cm/km)	**FACTORES DE ESTÍMULO O SANCIÓN (F_i)**	
10,0 o menos	ESTÍMULO	+ 0,05
10,1 a 14,0		+ 0,04
14,1 a 18,0		+ 0,03
18,1 a 22,0		+ 0,02
22,1 a 26,0		+ 0,01
26,1 a 31,0	0	
31,1 a 34,0	SANCIÓN	- 0,02
34,1 a 37,0		- 0,04
37,1 a 40,0		- 0,06
40,1 a 43,0		- 0,08
43,1 a 46,0		- 0,10
Mayor de 46,0	CORREGIR	

Tabla 4. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil, para la Norma N.CSV.CAR.3.02.005.04.

Actualmente el uso de la normativa SCT referente al acabado de la superficie en carpetas de reciente construcción se ha hecho cada vez más extensa, es común ver que en los términos de referencia de las obras, se solicita que se verifique la calidad de la superficie terminada.

Conviene comentar que en las normas señaladas anteriormente se hace referencia al uso de la norma ASTM E 1274, Standard Test for Measuring Pavement Roughness using a Profilograph (Método de Prueba Estándar para Medir la Rugosidad del Pavimento, utilizando un Perfilógrafo), de la cuál a continuación se transcriben unos fragmentos: [33]

Banda en Blanco. Una banda de altura uniforme con su centro longitudinal posicionado óptimamente entre los puntos altos y bajos del registro de la superficie, representando al menos 30 metros de pavimento (*véase*

Figura 44).

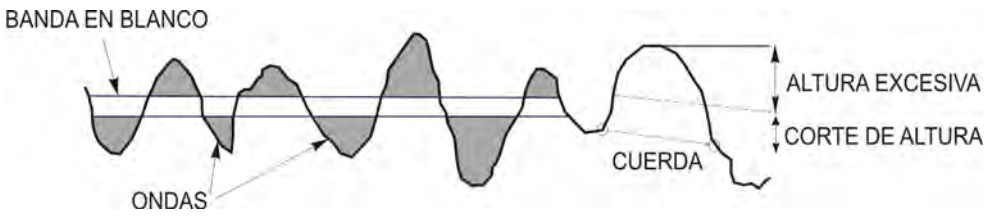


Figura 44. G*ráfica para lectura visual. Puede ser digital para manejarla en computadora*

Plantilla de Banda en Blanco (opcional). Tira de plástico transparente de aproximadamente 50 mm de ancho y por lo menos 100 mm de largo. Una longitud común es de 536.4 mm. El centro de la plantilla tiene marcado con una franja opaca el ancho de la banda en blanco estipulada, en toda su longitud, y con líneas a cada 2 mm arriba y abajo de la banda en blanco.

Aplique la banda en blanco a longitudes sucesivas del registro de la superficie. Determine la rugosidad a partir de cada protuberancia. Sume toda la rugosidad de cada segmento estipulado. Del registro de la superficie, determine la distancia longitudinal entre los puntos más lejanos de las protuberancias o no protuberancias iniciales y finales. Divida el resultado de la suma entre la distancia longitudinal correspondiente para calcular la tasa de rugosidad para ese segmento de esa ruta.
Informe.

Para cada aplicación específica deberá proporcionarse la siguiente información:

La altura de la banda en blanco con aproximación de 1 mm. (Por ejemplo, 2.54 o 5.08 mm).

Corte de altura con aproximación de 1 mm. (Por ejemplo, 7.6 mm)

Perfilógrafo con o sin llantas de plataforma de referencia uniformemente espaciadas.

La longitud de cada segmento para el cual se calcula la tasa de rugosidad.

Como podemos observar solamente se manejan valores de la Null Band de 2.54 y 5.08 mm, sin embargo, esto queda abierto ya que solamente se dan como ejemplo y no se especifican como reglamentados o que se deban cumplir.

También en el párrafo en el que se describe que es la Banda en Blanco o Null Band, se dice que “la plantilla tiene marcado con una franja opaca el ancho de la banda en blanco estipulada”; es decir, que previamente a la evaluación fue definido o acordado este valor, y de esta manera evitar que sea manejado a conveniencia.

Funcionamiento del equipo

Antes de hacer la evaluación del equipo modificando la Null Band en los tramos de experimentación, es importante conocer que el funcionamiento del Perfilógrafo Longitudinal Tipo California sea el correcto y se garantice su confiabilidad como equipo de medición, considerando la velocidad de operación que se recomienda en la norma ASTM 1274-03 y por el propio fabricante que es de 5 KPH. Las pruebas consistieron en hacer lo siguiente:

1. Calibración vertical y horizontal de acuerdo a la norma ASTM E1274-03.
2. Medir 7 tramos de 300 m de longitud.

3. Hacer 3 recorridos en cada uno de los tramos.
4. Considerar una Null Band de 0.00 mm.
5. Obtener el Índice de Perfil a cada 100 m en cada tramo y recorrido.
6. Verificar la repetibilidad del equipo.

Como ejemplo de los resultados de ésta verificación en la
Tabla **5** se muestran dos de los recorridos efectuados en el tramo 1 del km 12+900 al 13+200 de la carretera Morelia-Pátzcuaro (camino viejo), en el estado de Michoacán, ubicado este al Occidente del país.[34]

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm	
Hora	11:50 a.m.		Hora	12:02 a.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	104.96	12+900	13+000	101.36
13+000	13+100	119.36	13+000	13+100	120.63
13+100	13+200	186.07	13+100	13+200	172.66
	Promedio	**136.80**		**Promedio**	**131.55**

Tabla 5. Resultados de IP en los recorridos 1 y 2 del tramo 1.

Como puede observarse la variación de cada uno de los recorridos resulta del 4%, lo cual puede considerarse como un valor aceptable de repetibilidad. Es importante señalar que si cada uno de los recorridos se efectuara exactamente sobre el mismo perfil no existiría ninguna variación en la medida.

En otra investigación, se verificó la repetibilidad del equipo a diferentes velocidades de operación (2, 5 y 10 KPH) y a diversas temperaturas (15 a 35 ºC). Se encontró que el equipo tenía el mismo patrón de repetibilidad y que el rango de temperatura considerado no influye significativamente en el valor del Índice de Perfil.

Conviene señalar que también se analizó el funcionamiento del equipo con valor de Null Band de 5.08 mm y los resultados presentaban el mismo porcentaje de repetibilidad.

Tramos experimentales en la red carretera

Autopista Morelia-Salamanca

A fin de analizar la variación del Índice de Perfil al modificar la Null Band, se decidió estudiar un tramo de 100 m de longitud de una carpeta recientemente terminada del km 31+400 al 31+500, ver Figura 45, considerando valores de Null Band de 10 mm, 5.08

mm y de 0 mm. Se observó que al variar este valor el Índice de Perfil bajaba considerablemente al permitir una tolerancia de 10 mm y se volvía más alto al adoptar un valor de IP de 0 mm, ver Figura 46. El perfilograma de este tramo se muestra en la Figura 47. [34]

Figura 45. Vista del tramo evaluado de la autopista Morelia-Salamanca.

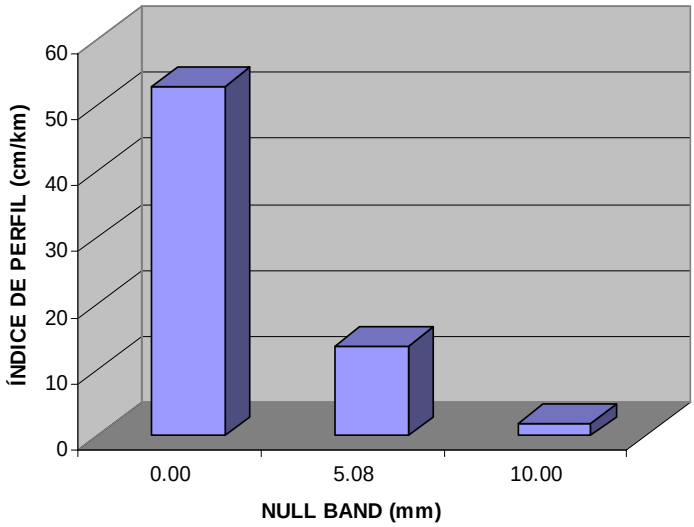


Figura 46. Resultados del Índice de Perfil con Null Band de 0.00, 5.08 y 10.00 mm en un tramo de 100 m de la autopista Morelia-Salamanca.

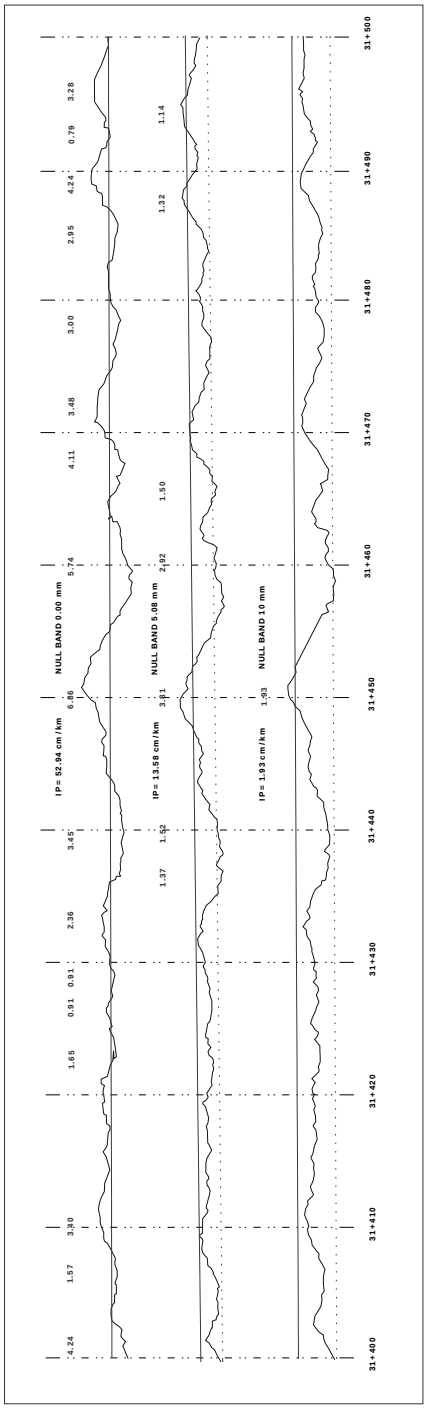


Figura 47. Perfilograma con Null Band de 0, 5.08 y 10 mm en un tramo de 100 m de la autopista Morelia-Salamanca.

Haciendo números y usando la ecuación 1 [14], si las dimensiones de la carpeta en este tramo son: espesor de carpeta 0.1 m, ancho de corona 12 m y longitud del tramo 100 m,

tendríamos un volumen de carpeta de 120 m^3. Si ahora se tiene un precio unitario de carpeta de $1500 pesos el m^3, ya colocada, entonces se tendría que pagar una bonificación de $9,000 pesos en este tramo y si pensamos que la autopista tiene una longitud de 25 km (25,000 m) en la jurisdicción de Michoacán, que arroja un volumen de carpeta de 30,000 m^3, podría llegarse a pagar la cantidad de $2,250,000.

$$E = (PU)(V)(\overline{F}) \qquad (1)$$

Donde:

E: Estímulo a pagar como bonificación cuando resulta positivo o sanción aplicada como deducción cuando resulta negativo, para cada tramo de un (1) kilómetro o fracción, ($).

V: Volumen de la carpeta asfáltica del tramo, (m^3).

PU: Precio unitario de la carpeta asfáltica fijado en el contrato, ($/$m^3$).

$\overline{F}$: Factor promedio de estímulo o sanción del tramo. Promedio aritmético de los factores de estímulo o sanción (*Fj*) para cada subtramo de doscientos (200) metros en cada línea de tendido, tomados de la tabla 4 de esta Norma, (adimensional).

Carretera Morelia-Quiroga-EC Teremendo

Se llevó también la verificación de la variación del Índice de Perfil en un tramo de 300 m de longitud de la carretera Morelia-Quiroga-E.C. Teremendo del km 7+300 al km 7+600, el cuál presenta una superficie de rodamiento más rugosa que la del tramo analizado en la autopista Morelia-Salamanca, ver Figura 48. En este tramo también se pudo apreciar claramente la influencia de la Null Band en el resultado final del Índice de Perfil, ver Figura 49. El perfilógrama de un subtramo de 100 m del km 7+300 al 7+400 (0+200 al 0+300) se muestra en la Figura 50. [34]

Figura 48. Vista del tramo evaluado de la carretera a Teremendo, Mich.

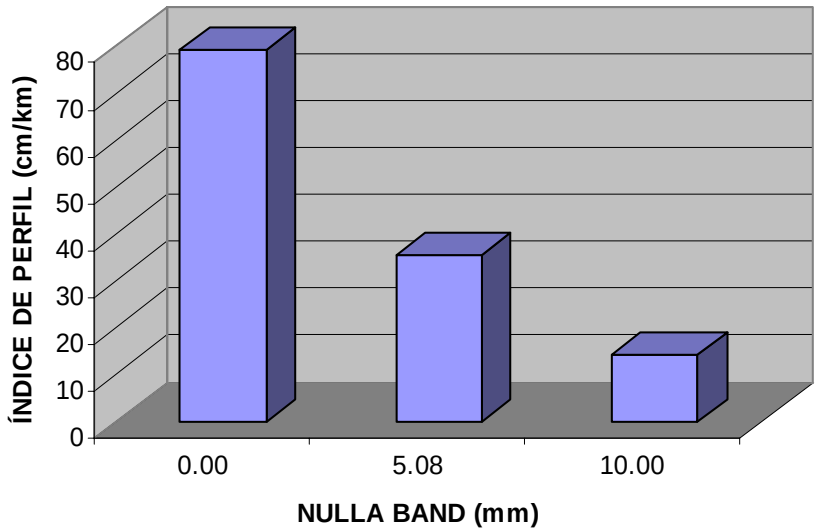


Figura 49. Resultados del Índice de Perfil con Null Band de 0.00, 5.08 y 10.00 mm en un tramo de 300 m de la carretera a Teremendo, Mich.

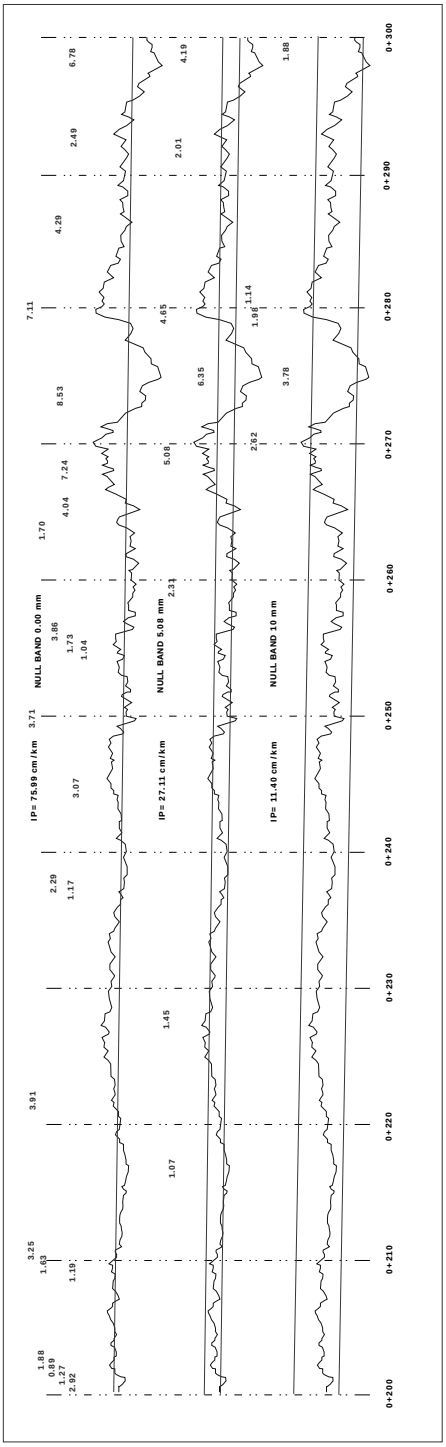


Figura 50. Perfilograma con Null Band de 0, 5.08 y 10 mm en un tramo de 100 m de la carretera Morelia-Quiroga-EC Teremendo.

Se observa en las Figuras 46 y 49, que aproximadamente se da la misma disminución de Índice de Perfil en el tramo de la autopista Morelia-Salamanca como en el tramo de la Carretera Morelia-Quiroga-E.C. Teremendo, aunque esta disminución parece ser más

significativa en el tramo de la autopista Morelia-Salamanca, debido seguramente a la menor irregularidad que presenta la superficie del pavimento.

Se aprecia que si se decide adoptar un valor de Null Band de 10.00 mm el valor final del Índice de Perfil obtenido con 5.08 mm (27.11 cm/km) tendría una reducción de aproximadamente el 60% (11.40 cm/km), de tal forma que el tramo que inicialmente estaba en zona de corrección (mayor de 24 cm/km), ahora se ubicaría en zona sin efecto (10.1 a 14 cm/km), es decir, no se le penalizaría por mala calidad.

Para el caso de esta carretera al hacer el mismo análisis numérico con espesor de carpeta 0.1 m, ancho de corona 7 m (sin acotamientos) y longitud del tramo de 300 m, tendríamos un volumen de carpeta de 210 m^3. Si ahora se tiene un precio unitario de carpeta de $1,500 pesos el m^3, ya colocada, entonces la sanción que evitaría el constructor usando la ecuación 1, tomando el factor de sanción económico más alto de -10%, sería de $31,500 pesos, cantidad que se incrementaría al aumentar la longitud del tramo, como se observó en el caso de la autopista Morelia-Salamanca.

Conclusiones

La calidad superficial de los pavimentos esta relacionada directamente con la intensidad de las cargas dinámicas que imponen los vehículos sobre su estructura, por lo que la entrega de tramos recién construidos o rehabilitados con la calidad que fijan las normas respecto al índice de perfil, garantiza que la vida útil de las carreteras, para la cuál fueron proyectadas, se cumpla y en algunos casos se prolongue.

En caso contrario, al entregar un pavimento carretero fuera de los rangos de calidad del Índice de Perfil que señala la normativa, afectará directamente a esta vida útil disminuyendo su período de diseño e incrementando sustancialmente los gastos de conservación y operación.

La Null Band afecta directamente al valor final del Índice de Perfil, descartando las irregularidades que se encuentran dentro de sus límites, de tal manera que entre más grande sea este valor más irregularidades se eliminarán y el Índice de Perfil ira decreciendo. Conviene señalar que en los inicios del Perfilógrafo el perfilograma era trazado mediante una graficadora y la Null Band era puesta sobre éste mediante una reglilla de plástico que al centro presentaba una banda opaca con el ancho de Null Band; actualmente este proceso es automático en la mayoría de los Perfilógrafos que se encuentran en el mercado.

La tolerancia o Null Band que se ha manejado en diversas Agencias Estatales de Carreteras de los Estados Unidos de Norteamérica, inicialmente fue de 5.08 mm; sin embargo, al avanzar la tecnología de carreteras decidieron no conceder ninguna tolerancia, adoptando un valor de Null Band de 0 mm, que representa un valor que se asemejaba más al perfil real medido.

En el caso de nuestro país, la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, ha encontrado en varios tramos aislados evaluados

con el Perfilógrafo Longitudinal Tipo California, considerando un valor de Null Band de 5.08 mm, que se cumple adecuadamente con el Índice de Perfil que se maneja en la normativa, incluso en zona de máxima bonificación; sin embargo, al no mantener la constancia y calidad en los trabajos de construcción, al final el promedio de todo el tramo no cumple, quedando generalmente en zona de penalización o de corrección de trabajos.

Analizando la normativa que maneja la aplicación del Índice de Perfil, se encontró que no se habla específicamente acerca del valor de la Null Band y solamente se encuentra referencia de ésta en la norma ASTM 1274, la cuál esta señalada en dicha normativa; sin embargo, se habla de la Null Band cómo una banda opaca que se encuentra posicionada al centro de una reglilla de plástico, cuyo ancho ha sido previamente establecido o citando que en el informe se debe de presentar este valor y como ejemplo señalan que puede ser de 2.54 o 5.08 mm.

Como puede verse, en ningún momento se dice que la Null Band debe ser un determinado valor, solamente se dice que debe ser estipulado y presentado en el informe; esto último es elemental, ya que nos señala como se obtuvo el Índice de Perfil, con o sin tolerancia, y que la Null Band se debe indicar en el reporte final de evaluación.

Como la Null Band actualmente en la normativa mexicana no es un valor que se haya estipulado, es decir, que se indique que debe ser tal o cuál valor, en los reportes del Índice de Perfil los constructores que hagan uso del equipo para verificar la calidad, pueden dar el valor máximo de 10 mm de Null Band que acepta el equipo o el que se le acomode, para procurar la calidad que señale el proyecto, incluso para que sea bonificado por sus trabajos. Por lo tanto, es fundamental que este parámetro se especifique y quede claramente definido antes de iniciar los trabajos de evaluación.

Conviene señalar que diversas Agencias Estatales de Carreteras de los Estados Unidos de Norteamérica, como la de California, Iowa y Florida, entre otras, señalan en el método de operación del Perfilógrafo Longitudinal Tipo California el valor que se debe usar de Null Band (0.2 plg (5.08 mm)) en la obtención del Índice de Perfil.[35], [36], [37]

Se sugiere que el valor de la Null Band de 5.08 mm sea tomado como valor de tolerancia para los trabajos de medición del Índice de Perfil con Perfilógrafo Longitudinal Tipo California, ya que no es tan estricto y se ha comprobado en diversos tramos de evaluación que se pueden alcanzar niveles de calidad adecuados de la superficie de rodamiento.

Siendo un poco exigentes, se piensa incluso, que puede adoptarse la filosofía de no otorgar ningún tipo de tolerancia, Null Band de 0 mm, para motivar a los constructores a que den su máximo esfuerzo para entregar trabajos de excelente calidad.

CAPÍTULO 6

INFLUENCIA DE LA CALIDAD SUPERFICIAL EN LOS COSTOS DE OPERACIÓN DE LAS CARRETERAS

Introducción

Durante mucho tiempo los responsables de la construcción, conservación y operación de las carreteras del país han hecho esfuerzos destinados a mejorar la calidad de las obras carreteras, desde la capacitación de su personal, publicación de normas técnicas que rijan las labores de las empresas que ejecutan obra pública, hasta la adquisición de equipos que midan el grado de calidad de obra terminada.

Dentro de las líneas estratégicas que ha definido la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para mejorar la calidad de los trabajos de construcción o reconstrucción de los pavimentos carreteros tanto asfálticos, como de concreto hidráulico, está la regularidad superficial, medida a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), definido por el Banco Mundial en 1986 cómo parámetro estándar de medición de la superficie. Éste valor comenzó a medirse en la red carretera del país a finales de la década de los 90's, mediante un equipo de tipo respuesta conocido como Mays Meter, con el propósito fundamental de gestionar recursos para la conservación de la red carretera primaria y ejes troncales carreteros.

A principios de la presente década la SCT creó una normativa que regula los trabajos de construcción y conservación de las carreteras, por medio de un parámetro conocido como Índice de Perfil (IP), que mide la calidad superficial terminada de carpeta asfáltica o de concreto hidráulico, bonificando los trabajos de excelente calidad superficial o castigando los trabajos de mala calidad, con cierto porcentaje del costo unitario de la carpeta. Para la verificación de ésta calidad la SCT adquirió cinco Perfilógrafos Longitudinales Tipo California.

Es conocido que la regularidad superficial de las carreteras repercute directamente en los costos de operación del transporte, debido a que una mala calidad de los trabajos de construcción, incrementa los deterioros que se generan en la superficie y dañan a los vehículos que transitan por ellas. Por el contrario, si la calidad es excelente, los costos de operación son bajos y disminuyen los impactos a la estructura carretera, reduciendo las acciones de conservación del pavimento, alargando su vida útil.

En el presente documento se analizan los resultados de la calidad superficial entregada mediante el IP y el IRI y su repercusión en los costos de operación, considerando dos casos: El primero es la autopista Morelia-Salamanca, tramo EC Copándaro-EC Yuriria, recién construida en el estado de Michoacán y el segundo es la carretera México-Toluca en su tramo Cuajimalpa- La Marquesa, en la capital del País, en la cuál se llevo a cabo la reconstrucción de la carpeta asfáltica.

Al final del estudio, se podrá tener una idea clara del costo que tenemos que pagar los usuarios de la Red Carretera Nacional al no cumplirse con los estándares de calidad en las obras de construcción y rehabilitación de carreteras, lo que significa un impacto muy importante en la economía nacional.

Correlación Índice de Perfil-Índice de Rugosidad Internacional

Antes de iniciar con los objetivos de éste artículo, es necesario que se establezca la correlación que existe entre el IP y el IRI, debido a que en la entrega de los trabajos de construcción y/o rehabilitación del pavimento se debe cumplir con la Normativa SCT, que señala el IP cómo parámetro para medir la calidad superficial, misma que fue editada en el 2000, y actualizada en 2001, 2002 y 2004 en cuatro libros, que son: Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente N.CTR.CAR.1.04.006, Carpetas Asfálticas con Mezcla en Frío N.CTR.CAR.1.04.007, Carpetas de Concreto Hidráulico N.CTR.CAR.1.04.009, y Carpetas de Granulometría Densa N.CSV.CAR.3.02.005.[14] Mientras que el IRI se utiliza como parámetro para alimentar el programa del Banco Mundial, adaptado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para las condiciones de nuestro país, para calcular los costos de operación en las carreteras y que es conocido como Vehicle Operating Cost México (VOCMEX).

El perfilógrafo se utiliza para medir el perfil longitudinal de un pavimento. Su principal uso está relacionado con el control de la construcción de pavimentos. Los perfilógrafos se han utilizado con éxito para el control de calidad de la construcción en miles de kilómetros de pavimentos en las últimas décadas.

El IRI se basa en un modelo matemático denominado cuarto de carro normalizado (Golden Quarter Car) circulando a 80 KPH. Dicho índice se obtiene a partir de la acumulación del desplazamiento relativo entre las masas de la carrocería y la suspensión del modelo, cuando el vehículo circula por el perfil del camino en estudio. Conviene señalar que éste parámetro actualmente en México no se encuentra normado para carreteras en operación o recepción de trabajos, sin embargo, se manejan los siguientes rangos de rugosidad en nuestro país: caminos en condiciones aceptables son aquellos que tienen un IRI menor de 3 m/km, regulares los que están entre 3 y 5 m/km y malos los que presentan un IRI superior a 5 m/km.[38]

Los perfilógrafos calculan el valor del IP en mm/km y pueden usarse para definir el IRI a través de la calibración de equipos de tipo respuesta, correlacionando los datos que arroja el perfilógrafo con el método de estadal y nivel (método de tipo clase I) [4] y con la respuesta o resultados de los equipos, de tal forma que se obtenga la relación entre estos dos parámetros de medición superficial (IP-IRI).

Para obtener la correlación de ambos parámetros se utilizaron siete tramos de calibración, en donde se levantaron los siguientes datos:

1. Selección de sitios de calibración de acuerdo a la Norma ASTM E1148-92.[39]

2. Levantamiento topográfico conforme a la Norma ASTM E 1364-95.[40]

3. Cálculo del IRI usando la norma ASTM E 1364.[41]

4. Cálculo del IP con una Null Band de 5.08 mm, conforme a lo mencionado en la norma ASTM E 1274-03.[42] Haciendo tres recorridos por tramo para verificar la repetibilidad del equipo, la cual resultó ser excelente con un error entre mediciones de menos del 5%.

Una vez definida la información, se procedió a elaborar la gráfica de correlación con los valores de IP en el eje de las ordenadas y los de IRI en el de las abscisas, la gráfica y ecuación se muestran en la Figura 51.

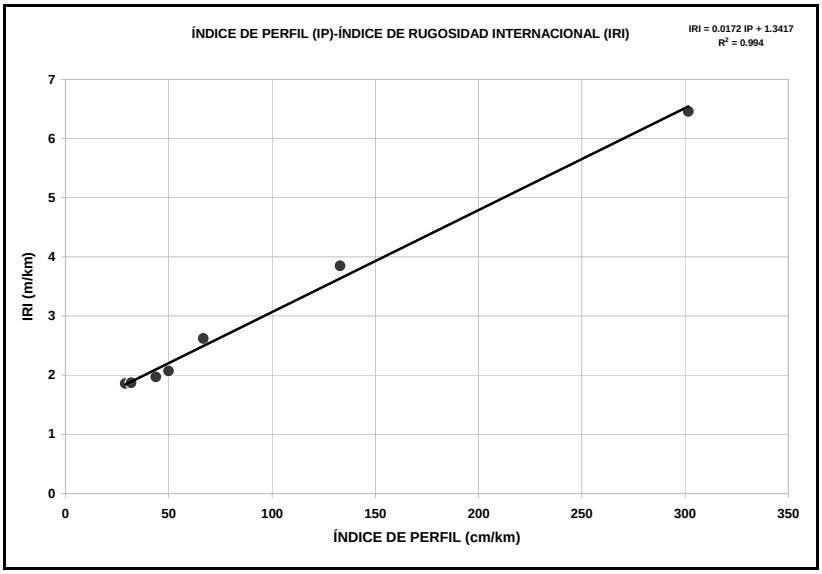


Figura 51. Gráfica y ecuación de correlación IP-IRI.

Como puede apreciarse en la gráfica, la correlación entre ambos valores es muy buena, teniendo un coeficiente de variación cercano a la unidad, por lo que, existe una correspondencia casi exacta. Por lo tanto, pueden predecirse o calcularse valores de IRI a partir de mediciones del IP con buena confiabilidad.

Costos de Operación

Los costos que se generan en un proyecto carretero y que todos los países deben afrontar durante la vida útil de una vía de comunicación se dividen en tres tipos:

- Costos de construcción.
- Costos de conservación.
- Costos de operación.

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, además de que 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[43]:

1. Combustible.
2. Lubricantes.
3. Llantas.
4. Reparación y refacciones.
5. Operador.
6. Depreciación y reposición de vehículos.
7. Intereses.
8. Seguros.
9. Tiempo de traslado de las mercancías.

Se uso el programa VOCMEX del IMT para calcular los costos de operación, alimentando los datos correspondientes a las características siguientes:

<u>De la carretera</u>

- Tipo de superficie
- IRI
- Pendiente, etc.

<u>Del vehículo</u>

- Peso
- Carga útil
- Potencia
- Velocidad
- Número de kilómetros conducidos por año
- Vida útil
- Costos unitarios, etc.

De los neumáticos

- Número de llantas por vehículo
- Costo de la llanta nueva, etc.

El análisis ha sido realizado por el IMT para siete tipos de vehículos, datos que utilizamos para calcular los costos de operación para ciertas condiciones específicas de rugosidad y de alineamiento vertical y horizontal. Los resultados obtenidos por el IMT se resumen en unas gráficas para cada tipo de vehículo, en donde se establece el efecto del deterioro de los caminos pavimentados en sus costos de operación. A partir de estas gráficas se pueden obtener los factores del costo de operación base de los vehículos conociendo el estado de la superficie de rodamiento definido por el IRI y el tipo de terreno (Plano, lomerío o montañoso). Se pueden obtener en unidades monetarias los costos de operación base para cada uno de los vehículos, multiplicando los consumos de los insumos (combustibles, lubricantes, llantas, refacciones, mantenimiento, etc.), en un kilómetro de camino por sus correspondientes precios unitarios.

A continuación, se muestran dos de las siete gráficas obtenidas por el IMT, la correspondiente al vehículo ligero y la del camión articulado. Ver Figura 52 y Figura 53.[44]

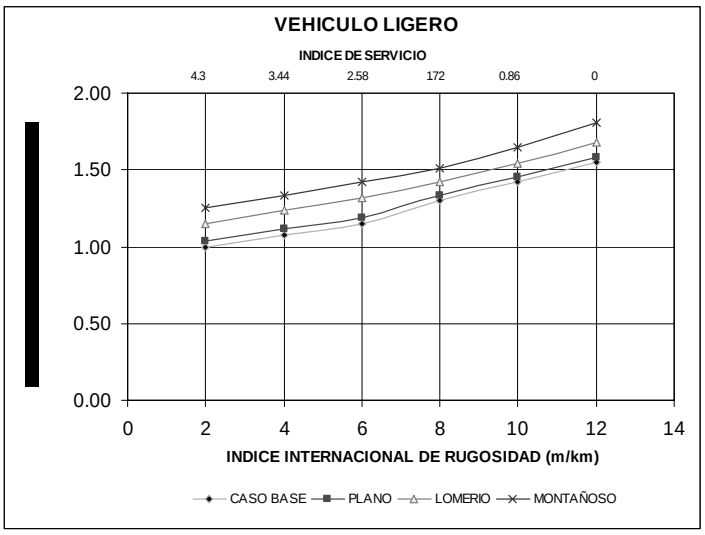


Figura 52. Factores del costo de operación base de un vehículo ligero, relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con el tipo de topografía del terreno.

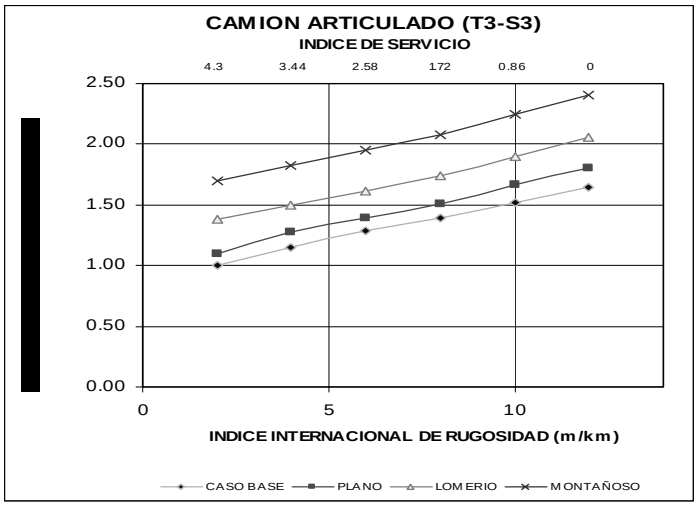


Figura 53. Factores del costo de operación base de un camión articulado (T3-S3), relacionando la condición superficial expresada en IRI o ISA con el tipo de topografía del terreno

Estas gráficas relacionan para cada uno de los siete tipos de vehículo y tres tipos de terreno, la rugosidad con el costo de operación. Este costo se considera como 1 en un tramo recto, de pendiente 0% y pavimento nuevo (IRI de 1 a 2 m/km), de tal forma que los costos correspondientes a otras condiciones de rugosidad y de alineamiento horizontal y vertical se expresan como un factor siempre mayor que 1; con esto se trata de eliminar la referencia a un precio variable.[14]

En éstas gráficas, las pendientes y curvaturas horizontales medias corresponden a un terreno plano con 1% y 100°/km, respectivamente; para lomerío de 3% y 300°/km y de 5% y 700°/km para terreno montañoso, sabiendo que al caso base le corresponden pendientes y curvaturas nulas. La curvatura media se entiende como la suma de los ángulos de deflexión en valor absoluto (ángulos centrales de las curvas), dividida entre la longitud del tramo y se expresa en grados por kilómetro (°/km). Debido a la poca influencia de rugosidades por debajo de un IRI de 2 m/km, tanto en los costos como en las velocidades, este rango no se incluyó en las gráficas. [14]

Evaluación de la rugosidad superficial en la autopista Morelia-Salamanca

La autopista Morelia-Salamanca forma parte del Eje Troncal Carretero 6 y en el tramo EC Copándaro- EC Yuriria, del km 26+700 al 45+800, para una longitud de 19.1 km, resolverá los problemas de tránsito y los puntos de conflicto que se presentan actualmente en la vía libre.

La autopista consta de un solo cuerpo con dos carriles de circulación de 3.5 m cada uno y acotamientos de 2.5 m, para un ancho de corona total de 12 m. La sección estructural del pavimento la conforman un pedraplén en las zonas donde el eje atraviesa la Laguna de Cuitzeo y terracerías en las zonas de lomeríos, sobre las cuales se apoya una base asfáltica y posteriormente una carpeta asfáltica de 10 cm. Ver Figura 54.

Figura 54. Vista de la autopista Morelia-Salamanca en dirección a la Ciudad de Morelia.

Para la verificación de la calidad superficial de la carpeta asfáltica, la SCT consideró en el contrato de la obra que se debería cumplir, usando un Perfilógrafo Longitudinal Tipo California, con el IP que índica la Normativa SCT para la Infraestructura del Transporte para Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente N.CTR.CAR.1.04.006 [14] cuyos valores se muestran en la Tabla 6.

ÍNDICE DE PERFIL (cm/km)	**FACTORES DE ESTÍMULO O SANCIÓN (F_j)**	
4 o menos	ESTÍMULO	+ 0,05
4,1 a 5,5		+ 0,04
5,6 a 7,0		+ 0,03
7,1 a 8,5		+ 0,02
8,6 a 10,0		+ 0,01
10,1 a 14,0	0	
14,1 a 16,0	SANCIÓN	- 0,02
16,1 a 18,0		- 0,04
18,1 a 20,0		- 0,06
20,1 a 22,0		- 0,08
22,1 a 24,0		- 0,10
Mayor de 24,0	CORREGIR	

Tabla 6. Factores de Estímulo o Sanción según el Índice de Perfil.

El IP total evaluado en los 19.1 km de longitud de la autopista fue de *32.16 cm/km*, que se ubica de acuerdo a la normativa en zona de corrección de trabajos por mala calidad. Conviene señalar que usando la ecuación de correlación IP-IRI definida anteriormente, el tramo tendría un IRI de *1.9 m/km*. Por otro lado, para el análisis de la variación de los costos de operación se calculo el IRI correspondiente al IP normal solicitado como de aceptación de trabajos sin estímulo o sanción, es decir entre 10.1 y 14 cm/km; el valor tomado de este rango es de *12 cm/km*, al que le corresponde de acuerdo a la ecuación de correlación un IRI de *1.5 m/km*.

Determinación de los costos de operación en la autopista Morelia-Salamanca

Para el cálculo de los costos de operación se definió el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) para esta vía de comunicación, cuyos datos se muestran en la Tabla 7.[45]

TIPO DE VEHÍCULO	%	Nº
VEHÍCULO LIGERO (A)	75.8	5,564
AUTOBÚS (B)	8.4	617
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	6.6	484
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	3.2	235
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	2.7	198
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	2.2	161
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	1.1	81
	100	7,340

Tabla 7. TDPA para la autopista Morelia-Salamanca.

De acuerdo con los datos de las características regionales de la zona donde se desarrolla la autopista, se consideró la topografía como terreno plano, con valores de pendiente y grado de curvatura media de 1%, 100°/km, respectivamente. El IRI utilizado fue de 1.9 m/km.

Conviene señalar, que para efectos de verificar la diferencia entre los costos de operación para condiciones de aceptación normal de regularidad superficial contra los de mala calidad (considerando el IP), se definió un valor de IRI de 1.5 m/km (IP sin estímulo ni sanción). Con estos datos, se obtuvieron los factores del costo de operación base, en relación a las condiciones específicas de la autopista, los cuales fueron obtenidos a partir de las gráficas del IMT y se muestran en la Tabla 8.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.5	IRI=1.9
VEHÍCULO LIGERO (A)	1.04	1.05
AUTOBÚS (B)	1.07	1.10
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	1.07	1.09
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	1.10	1.12
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	1.09	1.13
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	1.12	1.15
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	1.15	1.18

Tabla 8. Factores del Costo de Operación Base para la autopista Morelia-Salamanca.

Una vez obtenidos los factores del costo de operación base, 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 Enero y Febrero del 2006 y se obtuvieron precios unitarios promedios de algunos insumos y otros se obtuvieron de la publicación

técnica 202 del IMT incrementados un 50% de acuerdo con la inflación, con lo cual se obtuvieron los costos de operación base para los siete tipos de vehículos, los cuales se presentan en la Tabla 9.

CONCEPTO	UNIDAD	TIPOS DE VEHÍCULO						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
		CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD
COSTO DE OPERACIÓN BASE POR VEHÍCULO-KM:	$	2.23	10.78	5.44	7.21	10.17	10.94	13.53

Tabla 9. Costos de Operación Base para la autopista Morelia-Salamanca.

Con los costos de operación base para cada uno de los siete tipos de vehículos considerados, se procedió a calcular los costos de operación anuales, lo cual se obtiene con la aplicación de la ecuación 1.

$$COA = (F_B)\,(C_B)\,(TDPA)\,(365) \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

COA: Costos de operación vehicular anual ($).
F_B: Factor del costo de operación base (Adimensional).
C_B: Costo de operación base del vehículo ($).
TDPA: Tránsito Diario Promedio Anual.

Al aplicar la ecuación 1 se obtuvieron los costos de operación en este tramo de la autopista, los cuales se obtienen en millones de pesos por kilómetro, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 10.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.5	IRI=1.9
VEHÍCULO LIGERO (A)	4.710	4.755
AUTOBÚS (B)	2.598	2.670
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	1.028	1.047
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	0.680	0.693
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	0.801	0.831
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	0.720	0.739
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	0.460	0.472
MILLONES DE PESOS/KM/AÑO	**10.997**	**11.207**

Tabla 10. COA para la autopista Morelia-Salamanca.

Considerando la longitud total del tramo en estudio de esta carretera de 19.1 km, los costos de operación totales, son los que se muestran en la Tabla 11.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.5	IRI=1.9
VEHÍCULO LIGERO (A)	89.961	90.821
AUTOBÚS (B)	49.622	50.997
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	19.635	19.998
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	12.988	13.236
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	15.299	15.872
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	13.752	14.115
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	8.786	9.015
MILLONES DE PESOS/AÑO	**210.043**	**214.054**

Tabla 11. COA totales para la autopista Morelia-Salamanca.

Como puede observarse de la Tabla 11, entregar el tramo con la calidad superficial normal que se marca en la normativa sin estímulo o sanción (IP de 12 cm/km igual a IRI de 1.5 m/km) genera costos de operación de alrededor de 210 millones de pesos anuales, que serían los costos que tendría en condiciones normales la autopista.

Por otro lado, como los trabajos no fueron entregados con la calidad especificada, incluso llegando a quedar en zona de corrección de trabajos con un IP de 32.16 cm/km (IRI de 1.9 m/km), aplicando la norma SCT, se generan costos de operación anuales de 214 millones de pesos.

Los sobrecostos que se generan de pasar de un IRI de 1.5 m/km a uno de 1.9 m/km, son de aproximadamente el 2%, que traducido en pesos resulta de 4 millones de pesos anuales.

Evaluación de la rugosidad superficial en la carretera México-Toluca

La carretera México-Toluca forma parte del Eje troncal Carretero 1 y en su tramo Cuajimalpa-La Marquesa del km 22+000 al 34+500, para una longitud de 12.5 km, tiene uno de los aforos más altos de las carreteras en el país. Por ésta circulan diversos productos, mercancías y miles de personas que se trasladan por esta importante vía de comunicación hacia las ciudades de México y Toluca, y posteriormente a diversas zonas económicas de la nación como Guadalajara, León y el puerto de Lázaro Cárdenas, entre otras.

La carretera consta de dos cuerpos carreteros con dos carriles de circulación de 3.5 m cada uno, además de acotamientos externos de 3.0 m e internos de 1.0 m, para un ancho de corona total de 11 m por cuerpo. Ver Figura 55.

Figura 55. Vista de la carretera México-Toluca en dirección a la Ciudad de México.

Por su importancia, la carretera México-Toluca siempre debe estar en un alto nivel de servicio, por lo que las acciones de conservación son constantes e inmediatas. En el 2005 se concluyeron los trabajos de rehabilitación de la carpeta asfáltica del km 22+000 al 34+500, por lo que la SCT decidió evaluar la calidad superficial del tramo carretero con la aplicación de la Normativa SCT que se aprecia en la Tabla 12.

ÍNDICE DE PERFIL (cm/km)	**FACTORES DE ESTÍMULO O SANCIÓN (F_j)**	
10,0 o menos	ESTÍMULO	+ 0,05
10,1 a 14,0		+ 0,04
14,1 a 18,0		+ 0,03
18,1 a 22,0		+ 0,02
22,1 a 26,0		+ 0,01
26,1 a 31,0	0	
31,1 a 34,0	SANCIÓN	- 0,02
34,1 a 37,0		- 0,04
37,1 a 40,0		- 0,06
40,1 a 43,0		- 0,08
43,1 a 46,0		- 0,10
Mayor de 46,0	CORREGIR	

Tabla 12. Factores de Estímulo o Sanción según el IP, para la Norma N.CSV.CAR.3.02.005.04, Carpeta Asfáltica de Granulometría Densa.

El IP total evaluado en los 12.5 km de longitud de la carretera fue de *61.01 cm/km*, que de acuerdo a la Norma SCT debe ser aplicada una corrección de trabajos por mala calidad. Conviene señalar que usando la ecuación de correlación definida anteriormente para el IP de 61.01 cm/km, el tramo tendría un IRI de *2.4 m/km*. Por otro lado, para hacer el análisis de la variación de los costos de operación, se calculo el IRI correspondiente al IP de aceptación de trabajos normal (sin estímulo o sanción), es

decir entre 26.1 y 31.0 cm/km; el valor tomado de éste rango es de *28 cm/km*, al que corresponde, de acuerdo a la ecuación de correlación, un IRI de *1.8 m/km*.

Determinación de los costos de operación en la carretera México-Toluca

Para el cálculo de los costos de operación se definió el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) para esta vía de comunicación, cuyos datos se muestran en la Tabla 13. [45]

TIPO DE VEHÍCULO	%	Nº
VEHÍCULO LIGERO (A)	76.6	37,991
AUTOBÚS (B)	4.2	2,083
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	6.5	3,224
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	4.7	2,331
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	3.7	1,835
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	3.1	1,538
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	1.2	595
	100	49,597

Tabla 13. TDPA para la carretera México-Toluca.

De acuerdo con los datos de las características de la zona donde se desarrolla la autopista, se consideró a la topografía como terreno de lomerío, con valores de pendiente y grado de curvatura media de 3%, 300°/km, respectivamente. El IRI utilizado fue de 2.4 m/km.

Conviene señalar que para efectos de verificar la diferencia entre los costos de operación para condiciones normales de regularidad superficial contra los de mala calidad (considerando el IP), se definieron valores de IRI de 1.8 m/km (IP sin estímulo o sanción). Con todos estos datos, se obtuvieron los factores del costo de operación base, en relación a las condiciones específicas de esta carretera, los cuales fueron obtenidos a partir de las gráficas del IMT y se muestran en la Tabla 14.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.8	IRI=2.4
VEHÍCULO LIGERO (A)	1.13	1.20
AUTOBÚS (B)	1.25	1.28
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	1.26	1.40
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	1.38	1.45
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	1.30	1.39
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	1.36	1.46
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	1.47	1.50

Tabla 14. Factores del Costo de Operación Base para la carretera México-Toluca.

Una vez obtenidos los factores del costo de operación base, se procedió a calcular los costos de operación base de manera similar al de la autopista Morelia-Salamanca, los resultados se muestran en la Tabla 15.

CONCEPTO	UNIDAD	TIPOS DE VEHÍCULO						
		A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4
		CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD	CANTIDAD
COSTO DE OPERACIÓN BASE POR VEHÍCULO-KM:	$	2.23	10.78	5.44	7.21	10.17	10.94	13.53

Tabla 15. Costos de Operación Base para la carretera México-Toluca.

Con los costos de operación base para cada uno de los siete tipos de vehículos considerados, se procedió a calcular los costos de operación anuales, aplicando la ecuación 1. Se obtuvieron los costos de operación en el tramo analizado, los cuales se obtienen en millones de pesos por kilómetro, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 16.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.8	IRI=2.4
VEHÍCULO LIGERO (A)	39.943	37.107
AUTOBÚS (B)	10.245	10.491
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	8.066	8.962
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	8.465	8.895
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	8.855	9.468
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	8.352	8.966
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	4.319	4.407
MILLONES DE PESOS/KM/AÑO	**83.245**	**88.296**

Tabla 16. COA para la carretera México-Toluca.

Considerando la longitud del tramo en estudio de esta carretera, que es de 12.5 km, los costos de operación totales, fueron los que se muestran en la Tabla 17.

TIPO DE VEHÍCULO	ESTADO SUPERFICIAL	
	IRI=1.8	IRI=2.4
VEHÍCULO LIGERO (A)	436.788	463.838
AUTOBÚS (B)	128.063	131.138
CAMIÓN DE 2 EJES (C2)	100.825	112.025
CAMIÓN DE 3 EJES (C3)	105.813	111.188
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2)	110.688	118.350
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S3)	104.400	112.075
CAMIÓN ARTÍCULADO (T3-S2-R4)	53.988	55.088
MILLONES DE PESOS/AÑO	**1,040.563**	**1,103.700**

Tabla 17. COA totales para la Carretera México-Toluca.

Como puede observarse en la Tabla 17, entregar el tramo con la calidad superficial normal que manejan las normas con IP entre 26.1 y 31 cm/km (sin estímulo o sanción) genera costos de operación de alrededor de 1,041 millones de pesos anuales, que serían los costos que tendría en condiciones normales la carretera.

Por otro lado, como los trabajos no fueron entregados con la calidad especificada, incluso llegando a quedar en zona de corrección de trabajos con un IP de 61.01 cm/km

(IRI de 2.4 m/km), aplicando la norma SCT, genera costos de operación anuales de 1,103 millones de pesos.

Los sobrecostos que se generan por pasar de un IRI de 1.8 m/km (IP sin estímulo o sanción) a uno de 2.4 m/km, son de aproximadamente el 6 %, que traducido en pesos resulta en 62 millones de pesos anuales.

Conclusiones

Algunas personas dirán que hacer las cosas como siempre se han hecho es lo más correcto, que no es necesario que se mejoren los procesos constructivos y que los responsables de la red carretera del país exageran al querer pedir que se alcancen ciertos niveles de calidad, sobre todo en regularidad superficial, que lo más importante es corregir los defectos que sean visualmente perceptibles, como los baches, roderas, grietas, etc., sin embargo, no piensan que estos deterioros en los pavimentos carreteros tuvieron su origen muy probablemente en una mala regularidad superficial.

Como ya lo hemos señalado al inicio de este documento, es conocido que la regularidad superficial de las carreteras repercute directamente en los costos de mayor magnitud que se tienen en la infraestructura carretera que son los de operación del transporte, debido a que una mala calidad de los trabajos de construcción, incrementa los deterioros que se generan en la superficie y dañan a los vehículos que transitan por ellas. Por el contrario, si la calidad es excelente, no se incrementan los costos de operación y se reducen los impactos a la estructura carretera, reduciendo las acciones de conservación del pavimento y alargando su vida útil.

En la entrega de trabajos, ya sea de construcción o rehabilitación de pavimentos, se considera de suma importancia que sea con una calidad tal, que durante los primeros años de su vida útil no se generen deformaciones o deterioros, ni tampoco sobrecostos, por culpa de la regularidad superficial, sin embargo, parece ser que esto todavía no es un compromiso profundo en la mayoría de los constructores.

Los esfuerzos que se han hecho por parte de SCT para que niveles de calidad de excelencia sean alcanzados, van desde la capacitación de su personal, elaboración de normas que regulen los procedimientos constructivos y la adquisición de equipos para la verificación de ésta calidad.

En cuanto a las empresas constructoras se ha observado que éste compromiso no se ha adquirido, debido a que no se ha capacitado a su personal para el correcto manejo y uso de su equipo de pavimentación, ni tampoco se han molestado en revisar la normativa, lo cuál hacen después de terminar la construcción de las carpetas, cuando ya se han hecho observaciones de la mala calidad de sus trabajos.

Desgraciadamente en los dos casos expuestos en éste artículo, la calidad de entrega de los trabajos de construcción y rehabilitación, no fue la que se solicitaba en la normatividad correspondiente, por lo qué como vimos en los cálculos de costos de operación, esta mala calidad genera sobrecostos del 2% (4 millones de pesos) al pasar

del un IRI de 1.5 a 1.9 m/km para el caso de la Morelia-Salamanca y de 6% (62 millones de pesos) en la México-Toluca.

Como puede observarse en el año uno de cualquiera de los dos proyectos, la generación de sobrecostos por la entrega de trabajos con mala calidad es algo que repercute negativamente en la economía del país, primeramente en los pagos que tenemos que hacer los usuarios en el incremento de los precios de los productos y mercancías, por culpa del daño que sufren los vehículos de los distribuidores y que se carga directamente a los costos de los bienes que ofrecen; y por otro lado en los recursos financieros que se destinan a las acciones de conservación que se ejecutaran en un tiempo menor al proyectado en el diseño de la obra, además de los accidentes vehiculares que se pudieran generar por ésta mala regularidad.

Estos datos de sobrecostos resultan alarmantes, debido a que la longitud sumada de ambos tramos es de 31.6 km, y representan sólo el 0.09 % de la red nacional básica que consta de 35,927 km, por lo cual, y retomando lo señalado por el Director General de Servicios Técnicos en su conferencia por el festejo de los 30 años de Vías Terrestres en México “Estos sobrecostos pueden llegar a ser una cantidad similar al presupuesto destinado a la conservación de toda la red del país”.

Por lo tanto, necesitamos que todos los implicados en la entrega de los trabajos de construcción o reconstrucción de carreteras, desde el constructor hasta el supervisor, realmente desempeñen su labor con profesionalismo y honestidad. El constructor haciendo los trabajos previos de prueba que se le solicitan para verificar que todo su proceso constructivo es el adecuado para cumplir con la normativa antes de ejecutar los trabajos y el supervisor detectando las fallas a tiempo de los procedimientos de construcción antes de la entrega de los trabajos. De esta manera se evitarán futuros problemas de índole legal, económico y técnico, sobretodo los sobrecostos que tanto dañan a la economía de la nación por una mala calidad inicial.

ANEXO I

LEVANTAMIENTO DE CAMPO Y ANÁLISIS PARA LA CORRELACIÓN IP-IRI

TRAMO 1

Carretera: Morelia - Patzcuaro (Camino viejo) km 12+900 - km 13+200
Tramo: Del km 12+900 al 13+200

Figura 56. Vista del tramo 1 hacia Patzcuaro.

EVALUACIONES DEL TRAMO 1

CARRIL DERECHO

Evaluación del 9 de diciembre del 2005

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm	
Hora	11:50 a.m.		Hora	12:02 a.m.		Hora	12:17 a.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	104.96	12+900	13+000	101.36	12+900	13+000	87.51
13+000	13+100	119.36	13+000	13+100	120.63	13+000	13+100	119.24
13+100	13+200	186.07	13+100	13+200	172.66	13+100	13+200	169.7
	Promedio	**136.80**		**Promedio**	**131.55**		**Promedio**	**125.48**

Tabla 18

Recorrido	***4***		***Recorrido***	***5***		***Recorrido***	***6***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm	
Hora	12:28 p.m.		Hora	12:40 p.m.		Hora	12:50 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	103.86	12+900	13+000	99.85	12+900	13+000	111.76
13+000	13+100	126.26	13+000	13+100	116.22	13+000	13+100	122.46
13+100	13+200	188.23	13+100	13+200	184.55	13+100	13+200	183.84
	Promedio	**139.45**		**Promedio**	**133.54**		**Promedio**	**139.35**

Tabla 19

CARRIL DERECHO

Evaluación del 23 de enero del 2006

Recorrido	***7***		***Recorrido***	***8***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:10 p.m.		Hora	12:32 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	109.35	12+900	13+000	54.28
13+000	13+100	117.08	13+000	13+100	80.39
13+100	13+200	167.87	13+100	13+200	106.21
	Promedio	**131.43**		**Promedio**	**80.29**

Tabla 20

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 9 de diciembre del 2005

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm	
Hora	13:02 p.m.		Hora	13:13 p.m.		Hora	13:23 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	103.80	12+900	13+000	98.03	12+900	13+000	96.98
13+000	13+100	84.26	13+000	13+100	83.40	13+000	13+100	93.88
13+100	13+200	138.71	13+100	13+200	130.90	13+100	13+200	125.15
	Promedio	**108.92**		**Promedio**	**104.11**		**Promedio**	**105.34**

Tabla 21

Recorrido	***4***		***Recorrido***	***5***		***Recorrido***	***6***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	13:33 p.m.		Hora	13:43 p.m.		Hora	12:50 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	99.35	12+900	13+000	99.95	12+900	13+000	45.97
13+000	13+100	100.26	13+000	13+100	81.70	13+000	13+100	38.53
13+100	13+200	125.19	13+100	13+200	140.66	13+100	13+200	75.03
	Promedio	**108.27**		**Promedio**	**107.44**		**Promedio**	**53.18**

Tabla 22

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 23 de enero del 2006

Recorrido	***7***	
Null Band:	0.00 mm	
Hora	12:20 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**
12+900	13+000	98.99
13+000	13+100	81.78
13+100	13+200	141.79
	Promedio	**107.52**

Tabla 23

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 1

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	104.96	1	87.51
	2	119.36	2	99.85
	3	186.07	3	101.36
2	4	101.36	4	103.86
	5	120.63	5	104.96
	6	172.66	6	109.35
3	7	87.51	7	111.76
	8	119.24	8	116.22
	9	169.7	9	117.08
4	10	103.86	10	119.24
	11	126.26	11	119.36
	12	188.23	12	120.63
5	13	99.85	13	122.46
	14	116.22	14	126.26
	15	184.55	15	167.87
6	16	111.76	16	169.70
	17	122.46	17	172.66
	18	183.84	18	183.84
7	19	109.35	19	184.55
	20	117.08	20	186.07
	21	167.87	21	188.23

media	133.94
desviación	34.10
mediana	119.36
mínimo	87.51
máximo	188.23
IP DEL TRAMO 1	***120.44***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	103.80	1	81.7
	2	84.26	2	81.78
	3	138.71	3	83.4
2	4	98.03	4	84.26
	5	83.40	5	93.88
	6	130.90	6	96.98
3	7	96.98	7	98.03
	8	93.88	8	98.99
	9	125.15	9	99.35
4	10	99.35	10	99.95
	11	100.26	11	100.26
	12	125.19	12	103.8
5	13	99.95	13	125.15
	14	81.70	14	125.19
	15	140.66	15	130.9
6	16	98.99	16	138.71
	17	81.78	17	140.66
	18	141.79	18	141.79

media	106.93
desviación	21.02
mediana	99.65
mínimo	81.7
máximo	141.79

Tabla 24

TRAMO 2

Carretera: Morelia - Patzcuaro
Tramo: Del km 37+500 AL 37+800 (Sentido 1)

Figura 57. Vista del tramo 2 hacia Morelia.

EVALUACIONES DEL TRAMO 2

CARRIL DERECHO

Evaluación del 24 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	13:45 p.m.		Hora	13:55 p.m.		Hora	14:25 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
37+500	37+600	95.22	37+500	37+600	95.54	37+500	37+600	37.49
37+600	37+700	110.17	37+600	37+700	99.26	37+600	37+700	59.09
37+700	37+800	95.71	37+700	37+800	96.31	37+700	37+800	55.30
	Promedio	**100.37**		**Promedio**	**97.04**		**Promedio**	**50.63**

Tabla 25

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 24 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	14:05 p.m.		Hora	14:15 p.m.		Hora	14:35 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
37+500	37+600	99.95	37+500	37+600	103.21	37+500	37+600	59.87
37+600	37+700	85.51	37+600	37+700	85.54	37+600	37+700	53.55
37+700	37+800	85.83	37+700	37+800	85.13	37+700	37+800	34.20
	Promedio	**90.43**		**Promedio**	**91.29**		**Promedio**	**49.21**

Tabla 26

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 2

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	95.22	1	95.22
	2	110.17	2	95.54
	3	95.71	3	95.71
2	4	95.54	4	96.31
	5	99.26	5	99.26
	6	96.31	6	110.17

media	98.70
desviación	5.81
mediana	96.01
mínimo	95.22
máximo	110.17

IP DEL TRAMO 2 ***94.78***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	99.95	1	85.13
	2	85.51	2	85.51
	3	85.83	3	85.54
2	4	103.21	4	85.83
	5	85.54	5	99.95
	6	85.13	6	103.21

media	90.86
desviación	8.37
mediana	85.69
mínimo	85.13
máximo	103.21

Tabla 27

TRAMO 3

Carretera: Morelia - Patzcuaro
Tramo: Del km 37+700 AL 38+000 (Sentido 2)

Figura 58. Vista hacia Patzcuaro del tramo 3.

EVALUACIONES DEL TRAMO 3

CARRIL DERECHO

Evaluación del 25 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	11:38 a.m.		Hora	11:49 a.m.		Hora	12:34 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
38+000	37+900	76.45	38+000	37+900	75.05	38+000	37+900	50.00
37+900	37+800	60.27	37+900	37+800	59.94	37+900	37+800	29.10
37+800	37+700	53.11	37+800	37+700	53.60	37+800	37+700	16.99
	Promedio	**63.28**		**Promedio**	**62.86**		**Promedio**	**32.03**

Tabla 28

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 25 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:02 p.m.		Hora	12:12 p.m.		Hora	12:24 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
38+000	37+900	53.57	38+000	37+900	54.27	38+000	37+900	29.97
37+900	37+800	56.37	37+900	37+800	56.44	37+900	37+800	29.93
37+800	37+700	42.40	37+800	37+700	42.24	37+800	37+700	34.70
	Promedio	**50.78**		**Promedio**	**50.98**		**Promedio**	**31.53**

Tabla 29

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 3

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	76.45	1	53.11
	2	60.27	2	53.60
	3	53.11	3	59.94
2	4	75.05	4	60.27
	5	59.94	5	75.05
	6	53.60	6	76.45

media	63.07
desviación	10.29
mediana	60.105
mínimo	53.11
máximo	76.45

IP DEL TRAMO 3 ***56.98***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	53.57	1	42.24
	2	56.37	2	42.40
	3	42.40	3	53.57
2	4	54.27	4	54.27
	5	56.44	5	56.37
	6	42.24	6	56.44

media	50.88
desviación	6.73
mediana	53.92
mínimo	42.24
máximo	56.44

Tabla 30

TRAMO 4

Carretera: Morelia - Patzcuaro
Tramo: Del km 35+560 al 35+860 (sentido 2)

Figura 59. Vista del tramo 4 hacia Patzcuaro.

EVALUACIONES DEL TRAMO 4

CARRIL DERECHO

Evaluación del 26 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	11:41 a.m.		Hora	11:53 a.m.		Hora	12:27 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
35+860	35+760	92.49	35+860	35+760	91.35	35+860	35+760	46.37
35+760	35+660	69.38	35+760	35+660	65.82	35+760	35+660	39.34
35+660	35+560	72.12	35+660	35+560	70.49	35+660	35+560	34.16
	Promedio	**78.00**		**Promedio**	**75.89**		**Promedio**	**39.96**

Tabla 31

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 26 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:05 p.m.		Hora	12:15 p.m.		Hora	12:37 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
35+860	35+760	114.37	35+860	35+760	114.21	35+860	35+760	69.95
35+760	35+660	78.10	35+760	35+660	78.53	35+760	35+660	29.35
35+660	35+560	78.43	35+660	35+560	79.45	35+660	35+560	43.30
	Promedio	**90.30**		**Promedio**	**90.73**		**Promedio**	**47.53**

Tabla 32

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 4

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	92.49	1	65.82
	2	69.38	2	69.38
	3	72.12	3	70.49
2	4	91.35	4	72.12
	5	65.82	5	91.35
	6	70.49	6	92.49

media	76.94
desviación	11.79
mediana	71.305
mínimo	65.82
máximo	92.49

IP DEL TRAMO 4 ***83.73***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	114.37	1	78.10
	2	78.10	2	78.43
	3	78.43	3	78.53
2	4	114.21	4	79.45
	5	78.53	5	114.21
	6	79.45	6	114.37

media	90.52
desviación	18.42
mediana	78.99
mínimo	78.1
máximo	114.37

Tabla 33

TRAMO 5

Carretera: Morelia – Quiroga (Acceso a Teremendo)
Tramo: Del km 7+300 al 7+600 (sentido 2)

Figura 60. Vista del tramo 5 hacia el EC Morelia-Quiroga.

EVALUACIONES DEL TRAMO 5

CARRIL DERECHO

Evaluación del 10 de febrero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	11:48 a.m.		Hora	12:03 p.m.		Hora	12:59 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
7+600	7+500	60.90	7+600	7+500	57.33	7+600	7+500	30.15
7+500	7+400	99.28	7+500	7+400	92.64	7+500	7+400	49.72
7+400	7+300	78.08	7+400	7+300	75.99	7+400	7+300	27.11
	Promedio	**79.42**		**Promedio**	**75.32**		**Promedio**	**35.66**

Tabla 34

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 10 de febrero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:17 p.m.		Hora	12:30 p.m.		Hora	12:43 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
7+600	7+500	67.71	7+600	7+500	61.40	7+600	7+500	21.38
7+500	7+400	66.42	7+500	7+400	69.40	7+500	7+400	25.58
7+400	7+300	86.31	7+400	7+300	86.83	7+400	7+300	19.85
	Promedio	**73.48**		**Promedio**	**72.54**		**Promedio**	**22.27**

Tabla 35

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 5

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	60.90	1	57.33
	2	99.28	2	60.90
	3	78.08	3	75.99
2	4	57.33	4	78.08
	5	92.64	5	92.64
	6	75.99	6	99.28

media	77.37
desviación	16.66
mediana	77.035
mínimo	57.33
máximo	99.28

IP DEL TRAMO 5 ***75.19***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	67.71	1	61.40
	2	66.42	2	66.42
	3	86.31	3	67.71
2	4	61.40	4	69.40
	5	69.40	5	86.31
	6	86.83	6	86.83

media	73.01
desviación	10.84
mediana	68.56
mínimo	61.40
máximo	86.83

Tabla 36

TRAMO 6

Carretera: Cointzio-T. Morelos)
Tramo: Del km 3+500 al 3+800 (sentido 2)

Figura 61. Vista del tramo 6 hacia EC Morelia-Quiroga.

EVALUACIONES DEL TRAMO 6

CARRIL DERECHO

Evaluación del 31 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	11:59 a.m.		Hora	12:11 p.m.		Hora	13:13:00 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
3+800	3+700	289.64	3+800	3+700	275.80	3+800	3+700	223.96
3+700	3+600	176.32	3+700	3+600	159.06	3+700	3+600	120.56
3+600	3+500	150.01	3+600	3+500	149.73	3+600	3+500	103.16
	Promedio	**205.32**		**Promedio**	**194.86**		**Promedio**	**149.23**

Tabla 37

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 31 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:25 p.m.		Hora	12:39 p.m.		Hora	12:51 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
3+800	3+700	258.31	3+800	3+700	256.31	3+800	3+700	213.47
3+700	3+600	122.22	3+700	3+600	102.63	3+700	3+600	61.11
3+600	3+500	100.37	3+600	3+500	108.46	3+600	3+500	75.22
	Promedio	**160.30**		**Promedio**	**155.80**		**Promedio**	**116.60**

Tabla 38

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 6

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	289.64	1	149.73
	2	176.32	2	150.01
	3	150.01	3	159.06
2	4	275.80	4	176.32
	5	159.06	5	275.80
	6	149.73	6	289.64

media	200.09
desviación	64.87
mediana	167.69
mínimo	149.73
máximo	289.64

IP DEL TRAMO 6 179.07

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	258.31	1	100.37
	2	122.22	2	102.63
	3	100.37	3	108.46
2	4	256.31	4	122.22
	5	102.63	5	256.31
	6	108.46	6	258.31

media	158.05
desviación	77.26
mediana	115.34
mínimo	100.37
máximo	258.31

Tabla 39

TRAMO 7

Carretera: Cointzio-T. Morelos)
Tramo: Del km 0+400 al 0+700 (sentido 2)

Figura 62. Vista del tramo 7 hacia EC Morelia-Quiroga (sentido 2)

EVALUACIONES DEL TRAMO 7

CARRIL DERECHO

Evaluación del 31 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	11:42 a.m.		Hora	11:56 a.m.		Hora	12:54 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
0+700	0+600	343.31	0+700	0+600	361.67	0+700	0+600	266.44
0+600	0+500	336.62	0+600	0+500	331.69	0+600	0+500	268.81
0+500	0+400	317.89	0+500	0+400	312.10	0+500	0+400	314.19
	Promedio	**332.61**		**Promedio**	**335.15**		**Promedio**	**283.15**

Tabla 40

CARRIL IZQUIERDO

Evaluación del 31 de enero del 2006

Recorrido	***1***		***Recorrido***	***2***		***Recorrido***	***3***	
Null Band:	0.00 mm		Null Band:	0.00 mm		Null Band:	5.08 mm	
Hora	12:10 p.m.		Hora	12:24 p.m.		Hora	12:38 p.m.	
del km	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**	**del km**	**al km**	**IP (cm/km)**
0+700	0+600	443.70	0+700	0+600	440.61	0+700	0+600	363.13
0+600	0+500	379.90	0+600	0+500	391.37	0+600	0+500	316.12
0+500	0+400	323.62	0+500	0+400	328.10	0+500	0+400	280.47
	Promedio	**382.41**		**Promedio**	**386.69**		**Promedio**	**319.91**

Tabla 41

ESTADÍSTICA DEL TRAMO 7

CARRIL DERECHO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
1	1	343.31	1	312.10
	2	336.62	2	317.89
	3	317.89	3	331.69
2	4	361.67	4	336.62
	5	331.69	5	343.31
	6	312.10	6	361.67

media	333.88
desviación	17.91
mediana	334.16
mínimo	312.10
máximo	361.67

IP DEL TRAMO 7 ***359.22***

CARRIL IZQUIERDO

Recorrido	Medición	IP (cm/km)	Nº de Orden	IP (cm/km)
	3	323.62	3	323.62
	6	328.10	6	328.10
1	2	379.90	2	379.90
2	5	391.37	5	391.37
	4	440.61	4	440.61
	1	443.70	1	443.70

media	384.55
desviación	52.17
mediana	385.635
mínimo	323.62
máximo	443.7

Tabla 42

CORRELACIÓN IRI-IP

(NULL BAND 0.0 mm)

TRAMO	IP (cm/km)	IRI (m/km)	ECUACIÓN IRI=0.0161 IP+0.7281
Morelia-Patzcuaro km 37+700-38+000 (S-2)	56.98	1.87	1.6
Ent. A Teremendo km 7+300-7+600 (S2)	75.19	1.86	1.9
Morelia-Patzcuaro km 35+560-35+860 (S-2)	83.73	1.97	2.1
Morelia - Patzcuaro km 37+500-37+800 (S-1)	94.78	2.07	2.3
Morelia - Patzcuaro km 12+900-13+200 (S-1)	120.44	2.62	2.7
Cointzio - T. Morelos km 3+500 - km 3+800 S-2	179.07	3.85	3.6
Cointzio - T. Morelos km 0+400 - km 0+700 S-2	359.22	6.46	6.5

Tabla 43

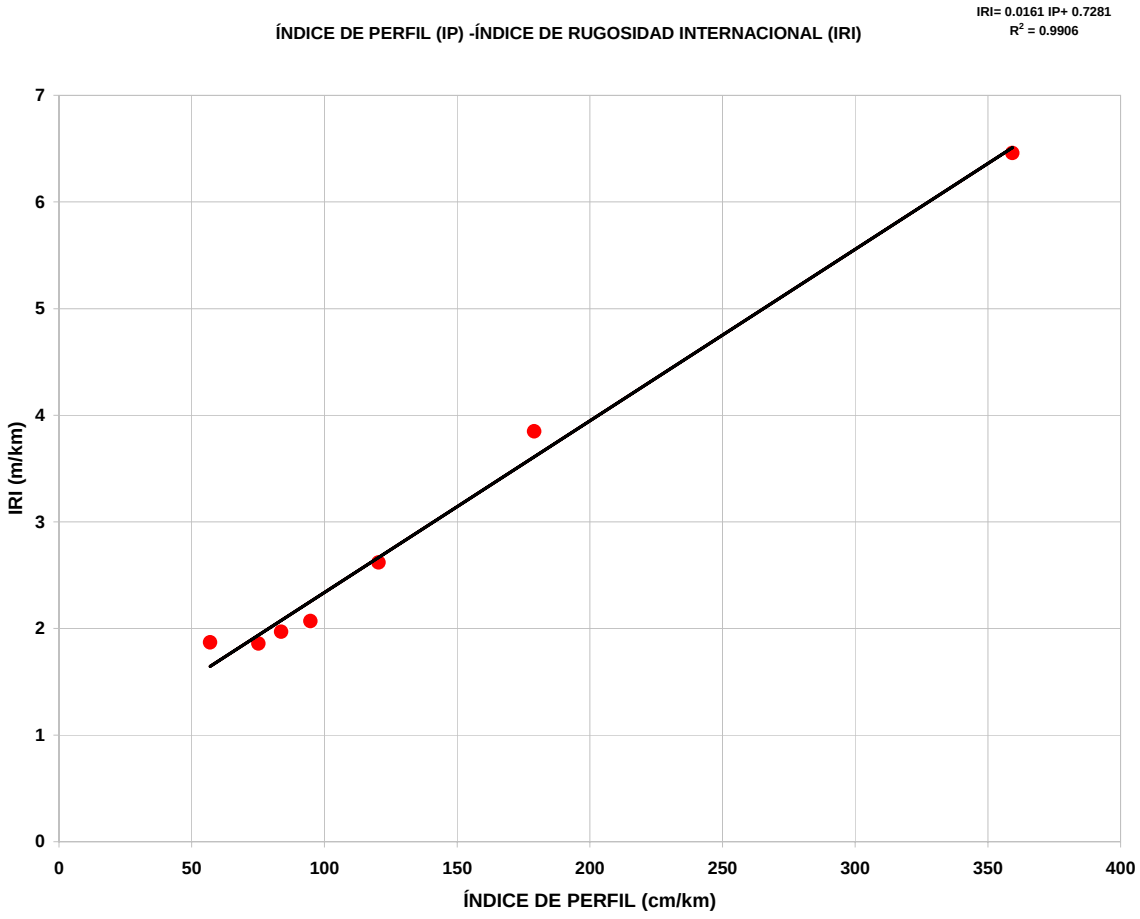


Figura 63

CORRELACIÓN IRI-IP

(NULL BAND 5.08 mm)

TRAMO	IP (cm/km)	IRI (m/km)	ECUACIÓN IRI=0.0172 IP +1.3417
Ent. A Teremendo km 7+300-7+600 (S2)	28.97	1.86	1.8
Morelia-Patzcuaro km 37+700-38+000 (S-2)	31.78	1.87	1.9
Morelia-Patzcuaro km 35+560-35+860 (S-2)	43.75	1.97	2.1
Morelia - Patzcuaro km 37+500-37+800 (S-1)	49.92	2.07	2.2
Morelia - Patzcuaro km 12+900-13+200 (S-1)	66.74	2.62	2.5
Cointzio - T. Morelos km 3+500 - km 3+800 S-2	132.91	3.85	3.6
Cointzio - T. Morelos km 0+400 - km 0+700 S-2	301.53	6.46	6.5

Tabla 44

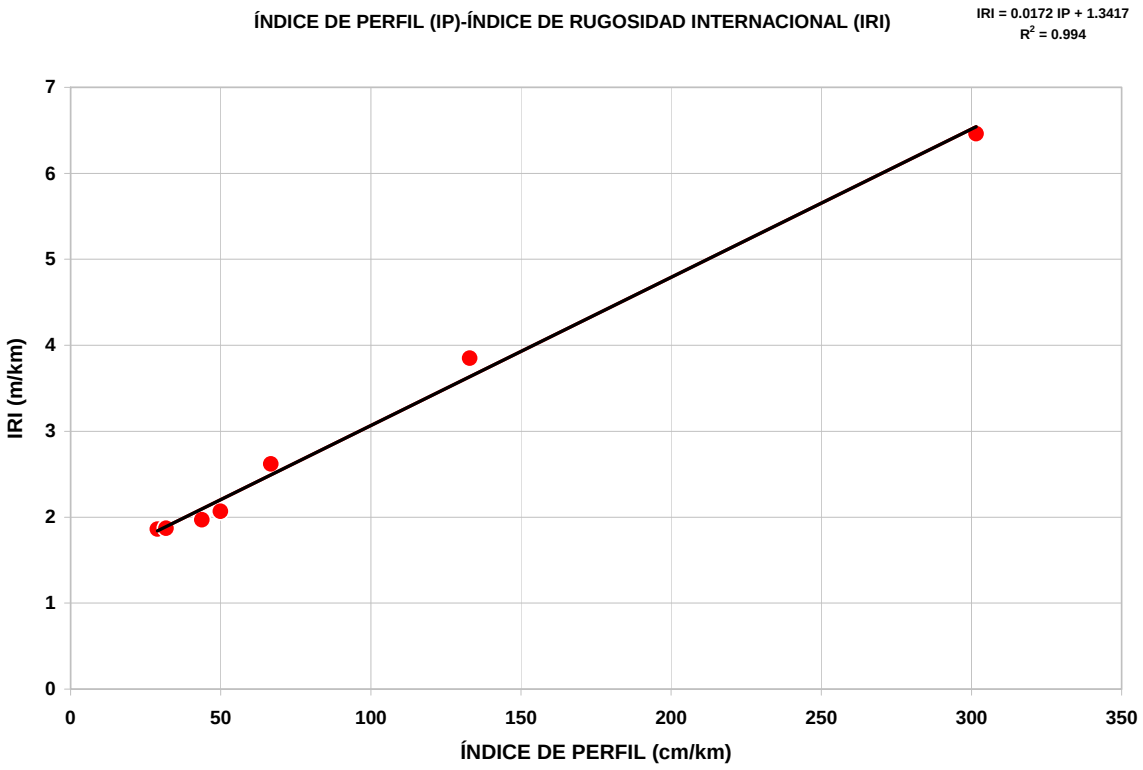


Figura 64

ANEXO II ASTM E1364-95

MÉTODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA MEDIR LA RUGOSIDAD DE CAMINOS POR EL MÉTODO DE NIVEL ESTÁTICO

1. Alcance

1.1 Este método cubre la medición de un perfil longitudinal del recorrido de una superficie usando un nivel estático con el propósito de obtener el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Este método de prueba es apropiado para todos los tipos de superficie que son recorridas por vehículos terrestres convencionales, incluyendo caminos pavimentados y sin pavimentar.

1.2 Este método de prueba es una labor intensiva respecto de otros medios de medición de perfiles longitudinales, y es usado principalmente para:

1. Validar otros métodos de medición de perfiles.
2. Calibrar sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta.

Nota 1. Cuando se haga la medición de la rugosidad de caminos se haga con nivel estático con el propósito de validar otros métodos de medición de perfiles o calibrar sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta, el proceso de medición de nivel estático debe ser evaluado para asegurarse de que las mediciones se encuentran dentro de la resolución requerida en la tabla 1. Es recomendable que diversos sitios sean marcados a diversas distancias del nivel y sean medidos en secuencia varias veces para establecer si las lecturas están dentro de la resolución requerida. Viento, distancia entre el estadal y el nivel, textura superficial y la posición del estadal, tienen un impacto significativo en la repetibilidad de la medición de las elevaciones. Cualquier variación de las elevaciones reales afectara sobre todo el sesgo que se explica en 10.2. Para determinar el efecto de las variaciones aleatorias, estás pueden agregarse a un perfil existente y recalcular el IRI para determinar el impacto de las variaciones.

1.3 Este método de prueba describe el cálculo requerido para un tipo particular de índice de rugosidad, la simulación del vehiculo usada en el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Adicionalmente, el perfil obtenido con este método puede procesarse para obtener otras medidas de rugosidad.

1.4 Este método de prueba incluye dos niveles de exactitud que pueden elegirse de acuerdo a lo que se necesite. La mayor exactitud, se designa como Clase 1, reduciendo el error de medición del índice de rugosidad a menos del 2% del valor real del índice. El segundo, designado como de Clase 2, implica errores menores del 5%.

1.5 Esta estandarización, no tiene el propósito de agregar todo lo concerniente a la seguridad, si cualquiera, asociada con este uso. Es responsabilidad de el usuario de ésta estandarización establecer practicas apropiadas de seguridad y salud en la determinación aplicada de limitaciones reguladas para este uso.

2. Referencias

2.1 Estándares ASTM:

E 950 Método de Prueba para Medir el Perfil Longitudinal de Superficie Recorridas con un Perfilador que Establece cómo Referencia un Acelerómetro inercial.

E 1082 Método de Prueba para medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de una Superficie Recorrida.

E 1170 Prácticas para Simular la Respuesta Vehicular a la Superficie Recorrida de Perfiles longitudinales.

E 1215 Especificaciones para Remolques Usados para Medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de los Caminos.

3. Resumen del Método de Prueba

3.1 Las medidas de la elevación superficial son obtenidas a intervalos constantes a lo largo de una línea en el recorrido de una superficie para definir el perfil longitudinal. La línea usada para el perfil es llamada rodada, trayectoria seguida por la llanta de el vehiculo en el camino. Los números medidos son grabados y almacenados en una computadora para su graficación y análisis. Los puntos del perfil son usados para alimentar el algoritmo de cálculo que produce el resumen del índice de rugosidad.

3.2 Este método de prueba describe el uso de un equipo convencional de evaluación consistente en un nivel óptico y estadal graduado, pero puede también aplicarse a técnicas automatizadas (por ejemplo, sistemas a base de láser) con los ajustes apropiados. Cómo mínimo, se requiere de dos personas; una para llevar y colocar el nivel (el estadalero), y el segundo leer las alturas relativas a través del instrumento nivelador y capturar las lecturas. Para una mayor eficiencia, es recomendable que una tercera persona capture las lecturas para que el operador del instrumento se concentre en los ajustes y lecturas. Cuando se desee una máxima velocidad de medición, se recomienda un equipo de cuatro miembros para actuar más fácilmente.

Tabla 1. Requisitos de Resolución

Rango de Rugosidad (IRI)				**Requisitos de resolución**			
				Clase 1		**Clase 2**	
(pda/milla)		(m/km)		(pda)	(mm)	(pda)	(mm)
0	30	0	0.5	0.005	0.125	0.01	0.25
30	63	0.5	1	0.001	0.25	0.02	0.5
63	190	1	3	0.02	0.5	0.04	1.0
190	317	3	5	0.04	1.0	0.08	2.0
317	444	5	7	0.06	1.5	0.12	3.0
444 ≤ IRI		7 ≤ IRI		0.08	2.0	0.16	4.0

4. Significado y uso

4.1 Este método de prueba proporciona los medios para obtener un índice de rugosidad estándar usando un equipo genérico. Este método de prueba en particular es simple pero de una intensa labor, y es más apropiado para establecer referencias de niveles de rugosidad para un limitado numero de sitios de prueba.

4.2 Los sitios cuya rugosidad sea medida con este método de prueba pueden ser usados para calibrar los sistemas de medición de tipo respuesta (ver Método de Prueba E1082).

4.3 Tales sitios también pueden ser usados para verificar la adecuada operación de otros sistemas de medición del perfil, y para establecer los niveles de exactitud para otros sistemas de medición del perfil (ver Método de Prueba E 950).

5. Aparatos

5.1 Cinta- Una cinta de evaluación es usada para localizar las medidas de elevación a intervalos constantes. La exactitud de la cinta debe estar dentro del 0.2% de el total de la longitud. Es de utilidad para marcar los sitios a los cuales las mediciones deben darse si no son claramente visibles cuando la cinta se pone en el suelo (por ejemplo, marcar intervalos de 1 pie con pintura brillante).

5.2 Nivel- El nivel debe ser diseñado para proporcionar lecturas de altura con los requisitos de resolución. Los requisitos de resolución son más exigentes para caminos regulares, y se resumen en la tabla 1 con base en los niveles de rugosidad de IRI. Los requisitos de resolución de la tabla 1 están más allá de las capacidades de la mayoría de los niveles usados en las evaluaciones rutinarias y construcción de caminos. Los niveles de precisión de los instrumentos usados para un trabajo de extremada exactitud o en la práctica de la construcción son requeridos para medir la rugosidad de la mayoría de los caminos pavimentados, los cuales están típicamente en el rango de IRI de 30 a 317 pda/milla (0.5 a 5 m/km). Con más precisión en la instrumentación de ésta naturaleza, el nivel y estadal (ver 5.3) son en conjunto calibrados. Típicamente, el nivel incluye un micrómetro para interpolar entre las marcas del estadal. Los instrumentos de nivelación métrica están disponibles con una resolución de 0.1 mm, lo cuál es suficiente para cualquier pavimento. La precisión de Clase 1es preferible cuando se validan sistemas perfiladores inerciales (ver 8.3). La precisión de Clase 2 se considera adecuada para calibrar sistemas de tipo respuesta.

Nota 2. Los equipos de evaluación están disponibles para medir la elevación de la superficie usando una viga láser como una referencia horizontal en lugar de un nivel. Tales equipos pueden usarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, mientras que se resuelva con los requisitos de resolución de la Tabla 1.

5.3 Estadal- El estadal debe estar marcado de tal forma que los cambios de elevación entre los puntos adyacentes del perfil puedan distinguirse con la precisión requerida. Con la mayoría de los niveles de precisión, la marcación en el estadal corresponde

puestos dentro de un micrómetro en el nivel (por ejemplo, valores de 10 mm son obtenidos visualmente de el estadal y valores de 0.1 mm son obtenidos del micrómetro).

Nota 3. Si se usa un nivel de base láser, un estadal adecuado debe usarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Si el instrumento no requiere marcas visibles en el estadal, tal marcación no se requerirá. De cualquier manera, para cualquier equipo que se use, el sistema total (instrumento y estadal) la resolución debe ser la especificada en 5.2.

5.3.1 La base del estadal debe diseñarse para permitir que las mediciones se repitan fácilmente. En casi todas las superficies de textura regular cualquier tipo de base es apropiada. Para el uso en superficies texturizadas, una placa circular con un diámetro de por lo menos 0.8 pda (20 mm) es sugerido para reducir la sensibilidad de las mediciones para pequeñas variaciones en la colocación del estadal.

Nota 4. En los límites del trabajo realizado a la fecha, placas con diámetros de 20 mm (0.8 pda) y 100 mm (4 pda) han sido usadas con éxito.

5.3.2 La distancia absoluta entre la base del estadal y las marcas no es relevante para mediciones de rugosidad. Por lo tanto, la corrección por temperatura no se requiere. También, modificaciones a la base del estadal son permitidas (ver 5.3.1) para mejorar la repetibilidad en superficies texturizadas.

5.3.3 Se recomienda fijar una burbuja de nivel al estadal para ayudar que se mantenga vertical.

5.4 Cálculo- Debido al fuerte potencial de error humano con la gran cantidad de datos obtenidos con éste método de prueba, todos los cálculos deben desarrollarse automáticamente por una computadora. La computadora debe tener la capacidad para:

1. Almacenar todos los datos sin tratar en un medio permanente (disco flexible, disco duro, cinta magnética, etc.).

2. Correr programas que desarrollen los cálculos descritos en 8.2 y 8.3.

3. Graficar el perfil calculado.

Nota 5. Casi todas las populares computadoras portátiles y de hogar tienen estas capacidades.

Nota 6. Casi cualquier lenguaje de computadora puede ser usado para implementar estas tareas. Elecciones comunes son Fortran, BASIC, Pascal y C. También hojas de cálculo y programas de análisis numérico de propósito general pueden usarse.

Nota 7. Diversas computadoras pueden emplearse para diferentes tareas. Por ejemplo, los cálculos del perfil pueden desarrollarse en la computadora A y mostrarlos usando la computadora B.

5.5 Grabación de datos- Lecturas del instrumento son típicamente grabadas escribiendo los números en papel (notas de campo). Debido a la gran cantidad de números que envuelven las mediciones individuales en éste método de prueba, se debe eliminar

como sea posible las fuentes críticas de error humano. Los formatos estandarizados de campo pueden ser usados con las distancias longitudinales impresas. Los formatos de campo deben complementar la visualización en la pantalla de la computadora cuando los números son escritos en la computadora.

6. Procedimiento

6.1 Seleccionar cada rodada que será perfilada en base a un criterio de longitud, nivel de rugosidad y tipo de superficie, dependiendo del uso que se le dará a la medición.

Nota 8. Cuando se calibren uno o más de dos remolques de sistemas de tipo respuesta, es necesario para la medición dos rodadas paralelas en la misma línea de recorrido. La distancia entre las rodadas debe ser aproximadamente la misma que la del ancho del remolque del sistema de tipo respuesta que será calibrado.

6.2 La línea que define la rodada debe ser marcada claramente con cal, pintura o algún otro método apropiado para identificar el punto inicial, los puntos de parada y la posición transversal de la línea a intervalos regulares a lo largo de la longitud. Estos intervalos no deben estar separados más de 50 pies (15 m). Marcar los puntos finales de la cinta para cada disposición. Estas marcas son necesarias para las mediciones con estadal y nivel y también para ser usadas por otros equipos de medición de la rugosidad que vayan a ser calibrados o validados, para asegurarse que las mediciones hechas por diferentes métodos cubren exactamente la misma rodada.

6.3 Poner la cinta en la rodada. Inicialmente, la posición del cero en la cinta es colocada al inicio de la rodada. Asegurar la cinta con pesas o cinta adhesiva. Tome lecturas a intervalos a lo largo de la longitud de la cinta. Cuando sea completado, mover la cinta de tal manera que el nuevo punto de cero coincida con el punto final anterior.

6.4 Coloque el instrumento de nivelación en un lugar que permita enfocar en el camino el inicio de la cinta y lo más que se pueda de la cinta como sea posible. Es recomendable que el tripie para el nivel se localice en línea con la rodada, para que la repetición de las lecturas a lo largo de la cinta pueda tomarse con un mínimo ajuste de visualización. Seguir las instrucciones del fabricante para un apropiado uso del instrumento. Cuando sea posible, coloque el tripie que soporta al instrumento bajo el suelo, para minimizar errores asociados con la inclinación del estadal (ver 7.4).

6.5 En los intervalos a lo largo de la cinta, medir y grabar la distancia entre el suelo y una altura arbitraria asociada con el nivel.

6.5.1 El intervalo máximo entre mediciones es 1.0 pie (305 mm) para la resolución de la Clase 1 y 2.0 pie (610 mm) para la resolución de la Clase 2. Intervalos más cortos son permitidos.

6.5.1.1 Los requisitos en 6.5.1 son validos para todos los tipos de superficie de los caminos, excepto en los casos en los cuales la rugosidad esta extremadamente localizada y ser pasados por alto para usar por arriba los intervalos muestreados (por ejemplo, pequeños parches, franjas de asfalto, etc.). Debido a los grandes esfuerzos

que implica hacer la reducción suficiente del intervalo de la muestra para capturar tales características, es recomendable que los sitios con rugosidad localizada no sean medidos con este método de prueba.

6.5.2 El estadalero colocará el estadal en la marca del cero de la cinta y lo alineará verticalmente, usando la burbuja de nivel como referencia. Cuando el estadal es apropiadamente colocado y alineado, el estadalero se lo señalará al operador del instrumento.

6.5.3 El operador del instrumento leerá la altura de acuerdo a las instrucciones del fabricante del equipo. Típicamente, el primer y segundo dígitos son obtenidos de las marcas en el estadal, y el tercero y cuarto son obtenidos usando un micrómetro en el nivel. La lectura es grabada por el tomador de lecturas. Cuando la lectura se ha hecho, el tomador de las lecturas llamará al estadalero para indicarle con una señal que puede mover el estadal a la siguiente posición.

6.5.4 Repetir 6.5.2 hasta el final del alcance de la cinta o la elevación bajo el estadal ponga al estadal fuera de rango.

6.6 Trasladar el nivel cuando cualquier rango horizontal es excedido (esto es, la distancia entre el nivel y el estadal es muy corta o muy grande para un adecuado enfoque) o el rango vertical es excedido (las marcas en el estadal están “fuera de escala” debido a la pendiente del camino). El nivel puede trasladarse en cualquier tiempo, sin tomar en cuenta la posición del estadal. Sin embargo, es necesario tomarlo en cuenta por el cambio en la altura del instrumento.

6.6.1 Después de mover el nivel, identificar la última medición en la libreta de campo. También, cuidar si es necesario las notas y marcas de localización en el pavimento. Este punto en el pavimento es el punto pivote para el cambio de altura en el instrumento que ocurre con la nueva disposición.

6.6.2 Repetir la primera toma de medición con el nivel en la posición actual y comparar con la primera lectura. Si la diferencia entre las dos lecturas es mayor que los requisitos de resolución (ver 5.2), entonces todas las mediciones tomadas con el nivel actual deben ser repetidas.

6.6.3 Mover el nivel a una nueva posición e instalarlo como se describe 4n 6.4.

6.6.4 Tomar una nueva medición con el estadal colocado en el punto pivote. Las notas de campo deben indicar que esta es una medida repetida y que el instrumento fue movido.

6.7 Con un experimentado equipo de tres, posicionamiento del estadal por el estadalero, las lecturas del nivel por el operador del instrumento y la captura de las mediciones por el tomador de notas, pueden sincronizarse de tal forma que el tiempo requerido para cada medición de la elevación sea menor de 10 segundos. Con varios días de experiencia, un equipo de tres puede medir perfiles a intervalos de 1 pie para un recorrido de 0.4 millas/día (0.64 km/día), con una resolución de 0.1 mm. Se necesita

más tiempo cuando las mediciones se hacen en una colina, debido a que se requiere hacer frecuentes cambios en el instrumento de nivelación.

7. Fuentes de Error

7.1 Como con cualquier práctica de medición, los errores son introducidos si el equipo esta defectuoso o es operado incorrectamente. Mas allá de de estas fuentes obvias de error, se tienen diversas fuentes obvias menores de error en este método de prueba que deben evitarse.

7.2 Captura y Entrada de datos- La fuente de error que más se dificulta para eliminar es en la captura de las mediciones individuales del nivel. Un medición típica de un perfil involucra al menos 265 lecturas individuales (1/10th milla, medición de Clase 2), y posiblemente miles. Estas deben escribirse en la libreta de campo y posteriormente capturadas en una computadora. Un número que afecta en el error y que tiene el mismo efecto en el cálculo de la rugosidad es un tope largo en el perfil. Por lo tanto, el grupo de evaluación debe tener presente de la relevancia de esto. (Los métodos de cálculo (8.1, 8.2) incluye diversas revisiones para identificar errores de esta clase).

7.3 Posición incorrecta del nivel- El instrumento de nivelación debe proporcionar el dato real horizontal. También, el soporte (por ejemplo, el tripie) no puede moverse durante o entre mediciones. Si el instrumento es golpeado, un nuevo pivote debe ser usado para establecer una nueva altura de instrumento. El nuevo punto de pivote debe ser el último sitio que fue marcado en el perfil lo cual es suficiente para permitir que la repetición de la medición sea hecha exactamente en el mismo punto (ver 6.6.2).

7.4 Desviación del estadal de la vertical real- La altura de una marca en el estadal arriba de un punto en la superficie es:

$$h = R\cos\theta$$

Donde:

R	Lecturas (la distancia de la base del estadal a la marca vista a través del nivel).
θ	Desviación angular del estadal de la vertical.
h	Altura por arriba del punto al cuál el estadal hace contacto en la superficie.

El error es la diferencia entre las lecturas (R) y la altura real (h) (por ejemplo, si el ángulo es de 5º y R es 60 pulgadas (15.24 m) entonces h es 59.772 pulgadas (15.18 m), para un error de 60-59.772= 0.228 pulgadas (0.058 m, 5.8 cm, 58 mm). Este error puede controlarse si:

1. Se mantiene θ cercano a cero usando la burbuja del nivel que se encuentra en el estadal.

2. Mantener R pequeño instalando el instrumento de nivelación bajo ((2 a 3 pies (0.61 a 0.91 m) de la superficie del suelo), para que se utilice principalmente el rango inferior del estadal.

7.5 Error Absoluto de la Elevación- La elevación absoluta no contribuye a la rugosidad y por lo tanto la elevación real es irrelevante para este método de prueba. Los métodos de Calibración y Control diseñados para limitar este tipo de error no se requieren. Por ejemplo, la distancia real de las marcas en el estadal a la base no son relevantes. (Solamente la distancia relativa entre marcas debe ser precisa).

7.6 Error Acumulado- El análisis de la rugosidad del IRI aplicados al perfil hace énfasis a los cambios de la elevación que ocurren dentro de 50 pies (15 m). Cambios acumulados en la elevación por encima de 200 pies (61 m) típicamente contribuye a valores menores de 0.2% del IRI. Esto es, el error acumulado que se tiene con cada disposición del instrumento de nivelación generalmente no es un problema cuando el análisis del IRI es usado. Para otras aplicaciones (por ejemplo, validar dispositivos de perfilado inercial) el error acumulado requiere de un control más estricto.

8. Cálculos

8.1 Entrada de datos- Debido a la gran cantidad de datos obtenidos es posible que se presente un error humano, por lo que todos los cálculos deben desarrollarse automáticamente por una computadora. El procedimiento usado para capturar las mediciones en la computadora debe ser diseñado para minimizar el potencial del error humano. Si es posible, lo que se muestra en la pantalla de la computadora debe corresponder al formato de campo, para minimizar la carga en la mecanografía y para facilitar la verificación rápida de los números capturados en pares de las notas de campo. Los números capturados en la computadora deben ser mediciones sin tratar de el campo. En proyectos anteriores, la computadora había sido programada para emitir un sonido cuando la diferencia entre entradas consecutivas excediera el umbral, para disminuir errores potenciales en la captura.

8.2 Elevación del Perfil- Las lecturas individuales del nivel son las distancias que se encuentran en los puntos correspondientes al perfil bajo un dato horizontal arbitrario establecido por el instrumento de nivelación, llamado altura del instrumento (IH). La elevación de cada punto es calculada por substracción de las lecturas de la IH. Esto es:

$$p_i = IH - R_i$$

Donde:

p_i	i^{th} elevación del perfil (i= 1, 2,....)
IH	Altura del instrumento
R_i	Lectura del estadal en el punto i^{th}

8.2.1 En trabajos convencionales de nivelación, la altura absoluta del instrumento es determinada cuidadosamente. Sin embargo, para trabajos de rugosidad, solo los cambios en la elevación son de interés, y la altura absoluta del instrumento no es de preocupación. La altura del instrumento es asignada arbitrariamente a un valor conveniente (por ejemplo, IH= 10 000 mm) para la primer posición. Aunque la altura inicial es arbitraria, todas las mediciones tomadas para un solo perfil deben estar correctamente referenciadas a esta altura.

8.2.2 Cuando el instrumento de nivelación es movido, la nueva altura es calculada de lecturas repetidas de un punto pivote, obtenido como se describe en 6.5. La nueva altura del instrumento es:

$$IH_{nueva} = IH_{anterior} + R_{nueva} - R_{anterior}$$

Donde:

IH_{nueva} y $IH_{anterior}$	Nueva y anterior altura del instrumento, respectivamente.
R_{nueva} y $R_{anterior}$	Nueva y anterior lectura del estadal para el punto pivote

8.2.3 Graficación del perfil. Una gráfica debe ser preparada para que muestre la elevación del perfil en función de la distancia longitudinal. El propósito de la gráfica es identificar cualquier punto que haya sido medido o leído incorrectamente y que introduzca un tope o hundimiento ficticios en el perfil. La gráfica debe ser escalada de tal forma que los errores de elevación de 0.1 pulgadas (2.5 mm) sean visibles. Se recomienda hacer una copia en el disco duro de ésta gráfica para propósitos de reporte, siendo adecuado verla en pantalla para verificar la integridad de los datos.

8.3 Cálculo de la rugosidad- La elevación del perfil obtenida en 8.2 es usada como entrada en un algoritmo que reduce los cientos o miles de valores de elevación a un solo índice de rugosidad. La elección del índice de rugosidad puede hacerse de acuerdo con la finalidad que se quiera dar a los datos.

8.3.1 Calibración de Sistemas de Tipo Respuesta- Sí el índice de rugosidad será usado como referencia para calibrar un sistema de tipo respuesta, es sugerido el IRI. El IRI es obtenido por la simulación de un modelo de vehículo de cuarto de carro que recorre el perfil, usando valores de parámetros estandardizados del vehículo y simulando un recorrido a una velocidad de 50 MPH (80 KPH). Detalles para calcular el IRI y verificar el programa de computo están incluidos en el Documento Técnico 46 del banco Mundial, en las páginas 31 a 43. La figura X1.1 del apéndice X1 muestra un ejemplo del programa en el lenguaje de computo BASIC, el cuál puede modificarse según lo que se necesite. Los valores de los parámetros del vehículo para el IRI son los mismos presentados en la Tabla 1 de la Práctica E 1170, para la simulación del cuarto de carro montado en el vehículo de medición para el recorrido.

8.3.2 Validación de Sistemas de Perfilado- Si el índice de rugosidad es usado para validar sistemas de perfilado (por ejemplo, el Método de Prueba E950), entonces los

mismos análisis usados para procesar las mediciones de los sistemas que perfilan pueden aplicarse a los perfiles obtenidos por estadal y nivel. Cuando se comparan los perfiles provenientes de estadal y nivel con los obtenidos con los sistemas inerciales de perfilado las gráficas simples del perfil no son significativas porque los sistemas inerciales no incluyen las longitudes de onda más largas. Las gráficas del perfil pueden compararse solamente después de que los perfiles obtenidos por diferentes fuentes sean filtrados idénticamente. El Reporte de la FHWA Nº FHWA/RD/86/100 describe diversos métodos para validar sistemas de perfilado a través de la comparación con las mediciones de estadal y nivel, mostrando un ejemplo de las comparaciones para diez sistemas inerciales de perfilado.

9. Reporte

9.1 Notas de Campo- Las notas de campo pueden incluir la información siguiente:

9.1.1 El día en el cuál las mediciones fueron hechas.

9.1.2 Los nombres de los miembros del equipo de evaluación.

9.1.3 Una descripción de las rodadas que sea suficiente para localizarlas y hacer mediciones repetitivas (por ejemplo, carril, distancia transversal entre las rodadas y la orilla del carril, punto de inicio, etc.).

9.1.4 Todas las lecturas tomadas del estadal a lo largo de las rodadas.

9.1.5 Puntos de Pivote, en los cuales el instrumento de nivelación fue reajustado.

9.1.6 Lecturas de repetición del estadal en los puntos de pivote.

9.2 Datos Almacenados en la Computadora- El software usado en la computadora para capturar los datos almacenará los números sin filtrar en u medio permanente, tales como disco flexible, disco duro, cinta, etc. A través de ésta organización o de otro método, el archivo de la computadora puede contener toda la información necesaria para reconstruir los datos numéricos contenidos en las notas de campo. Como mínimo, se debe asociar cada lectura del estadal con una posición longitudinal y una altura del instrumento. Es recomendable que los archivos de la computadora también guarden toda la información de comentarios y descripciones de las notas de campo.

9.3 Gráficas- Es recomendable (pero no una obligación) que la gráfica de elevación-distancia longitudinal sea preparada para cada perfil (ver 8.2.3).

9.4 Rugosidad- El reporte contendrá la siguiente información:

9.4.1 El día en el cuál las mediciones fueron hechas.

9.4.2 Los nombres de los miembros del equipo de evaluación.

9.4.3 Una descripción de las rodadas que sea suficiente para localizarlas y hacer mediciones repetitivas.

9.4.4 El tipo de análisis de rugosidad desarrollado (por ejemplo, IRI).

9.4.5 Los valores numéricos del índice de rugosidad.

10. Precisión y Sesgo

10.1 Precisión- Los datos disponibles limitados indican que se desea en las especificaciones para el resultado de las medidas para la Clase 1 una precisión de capacidad de repetición (repetibilidad) para la rugosidad de IRI de un perfil 528 pies (160 m) de longitud, que esté dentro del 2% del valor medio de las medidas repetidas. Para la Clase 2 la precisión de las mediciones es un 5% del valor del IRI para un perfil de 528 pis (160 m). Una mejor precisión es obtenida para longitudes de perfil más largas.

10.2 Sesgo- Casi cualquier forma de error en las mediciones causa un sesgo ascendente en el índice de rugosidad obtenido con éste método de prueba. Por ejemplo, si un equipo convencional de evaluación es usado con una resolución vertical de 0.01 pies (0.12 pulgadas = 3 mm), el IRI calculado del perfil puede ser alto cercano a 20 pulgadas/milla (0.3 m/km), lo cuál es excesivo para los pavimentos regulares. Por otra parte, un incremento en el intervalo de la muestra a más de 1 pie, permitido para mediciones de Clase 1, causa un sesgo descendente. Para mediciones de Clase 2, el error de sesgo es menor del 2% de los valores de IRI obtenidos con mediciones de Clase 1. El sesgo para mediciones de Clase 1 todavía no se ha determinado.

APENDICE
(Información no obligatoria)

X1. Cálculo del IRI

X1.1 Figura X.1.1, un programa de BASIC adaptado del Documento Técnico 46 del Banco Mundial, calcula el IRI cuando los puntos del perfil están espaciados a intervalos de 1 pie. Este programa se proporciona para ilustrar el método de cálculo. Por simplicidad, no trabaja recíprocamente con los archivos de la computadora (se requiere que los puntos de elevación del perfil sean mecanografiados manualmente). Para hacer el programa apropiado para su uso rutinario, comandos específicos para una computadora en particular son necesarios para abrir el archivo (después de la línea 1160) que contiene los datos del perfil. Las líneas 1160, 1170, 1270 y 1290, pueden modificarse para que sea leído del archivo.

X1.2 Los siguientes cambios pueden hacerse si las salidas del programa se prefieren en unidades de elevación por metro; la línea 1060 debe leerse “K= INT (0.25/DX+0.5)+1”; la línea 1160 debe leerse “11 m” en lugar de “36 pies” ; la línea 1180 debe leerse “Z1(1)= (Y(K)-Y(1))/11”; y la línea 1510 debe leerse “DATA 0.3048”.

X1.3 Si otro intervalo de muestra diferente de 1 pie es usado, las líneas 1520 a 1550 deben ser cambiadas como se describe en el Documento Técnico 46 del Banco Mundial.

ANEXO III ASTM E1148-92

MÉTODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA LA CALIBRACIÓN DE SISTEMAS USADOS PARA MEDIR LA RESPUESTA VEHICULAR A LA RUGOSIDAD DE PAVIMENTOS

1. Alcance

1.1 Esta práctica describe el equipo y procedimiento para la calibración de los sistemas usados para medir la respuesta vehicular a la rugosidad de los pavimentos. Tales sistemas son conocidos como sistemas de tipo respuesta. (Ver Método de Prueba E 1082).

1.2 Los sistemas de tipo respuesta incluyen el vehiculo, el conductor y contenido del vehículo, el remolque acoplado (si se usa uno con el sistema), y un dispositivo llamado medidor del camino que mide la respuesta del vehiculo a la rugosidad del camino. El medidor del camino puede ser montado en un automóvil, camioneta, o en un remolque acoplado. Los dispositivos de Tipo Respuesta (medidor del camino) cubiertos en esta práctica incluyen: dispositivos que miden el movimiento relativo del eje de un vehiculo. Dispositivos que miden la aceleración vertical del vehiculo, y dispositivos que miden la aceleración vertical del eje del vehiculo.

1.3 Los procedimientos de calibración descritos en esta práctica están limitados a el uso de las simulaciones descritas en la práctica E 1170.

1.4 Esta práctica no esta pensada para aplicarse a un equipo que mide la rugosidad del pavimento cuya salida no este influenciada por la respuesta del vehículo receptor.

1.5 Los valores establecidos en unidades de pulgadas-libra deben estar respecto de la estándar. Las unidades SI dadas en paréntesis pueden aproximarse y se dan solamente con carácter informativo.

1.6 Esta estandarización, no tiene el propósito de agregar todo lo concerniente a la seguridad, si cualquiera, asociada con este uso. Es responsabilidad de el usuario de ésta estandarización establecer practicas apropiadas de seguridad y salud en la determinación aplicada de limitaciones reguladas para este uso.

2. Referencias

2.1 Estándares ASTM:

E 867 Terminología Relacionada con las Características de Superficies Recorridas.

E 950 Método de Prueba para Medir el Perfil Longitudinal de Superficie Recorridas con un Perfilador que Establece cómo Referencia un Acelerómetro inercial.

E 1082 Método de Prueba para medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de una Superficie Recorrida.

E 1170 Prácticas para Simular la Respuesta Vehicular a la Superficie Recorrida de Perfiles longitudinales.

E 1215 Especificaciones para Remolques Usados para Medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de los Caminos.

E 1364 Método de Prueba Estándar para medir la rugosidad de caminos por el Método de Nivel Estático.

3. Terminología

3.1 Definiciones

3.1.1 Índice de rugosidad de la mitad de carro (HRI)- Un índice resultante de una simulación matemática de la respuesta vehicular a el perfil longitudinal de dos rodadas de un pavimento usando el modelo de mitad de carro descrito en la práctica E 1170 a una velocidad de recorrido de 50 MPH (80 KPH). Las unidades son pulgadas por milla o metros por kilómetro (63.3 pulgadas/milla = 1.0 m/km).

3.1.2 Índice de rugosidad internacional (IRI)- Un índice resultante de una simulación matemática de la respuesta vehicular a el perfil longitudinal de una rodada de un pavimento usando el modelo de cuarto de carro descrito en la práctica E 1170 a una velocidad de recorrido de 50 MPH (80 KPH). Las unidades son pulgadas por milla o metros por kilómetro (63.3 pulgadas/milla = 1.0 m/km).

3.1.3 Definiciones adicionales de términos relacionados a esta práctica pueden encontrarse en las definiciones de E 867.

3.2 Definición de Términos Específicos a esta Estandarización:

3.2.1 Número del Sistema de Tipo Respuesta (RTSN)- Serán calibradas las salidas de las mediciones sin tratar de un sistema de tipo respuesta. Las unidades son arbitrarias, siendo cualquiera del medidor del camino en las medidas de los sistemas de tipo respuesta.

4. Uso y Significado

4.1 Las medidas obtenidas por un sistema de tipo respuesta dependen básicamente del diseño y condición del vehiculo, de la carga, de la velocidad de medición y de las condiciones imperantes del medioambiente. Con un control regular de todas las variables significativas, la respuesta de cada vehiculo es única. Esto es, las medidas sin tratar de cada sistema no son reproducibles con otros sistemas.

4.2 La calibración descrita en esta práctica proporciona un método para convertir las salidas sin tratar de un sistema de tipo respuesta en particular para reproducirlo a una escala de rugosidad estándar.

4.2.1 La respuesta de un vehiculo a la rugosidad del camino es un fenómeno complejo que puede ser resumido en una prueba de laboratorio. Por lo tanto, la calibración es hecha a través de la correlación con valores de índices de rugosidad estándar, establecidos por calibraciones en sitios situados en caminos representativos. Los datos de los sitios de calibración son analizados para determinar una ecuación que estime el índice de rugosidad estándar de un RTSN.

4.3 La estimación del índice de rugosidad estándar hecha por la transformación de un RTSN esta sujeta a tres tipos de error:

4.3.1 Error Aleatorio de un Sistema de Tipo Respuesta (Repetibilidad)- Este error incluye errores del operador y variabilidad en la respuesta del vehiculo y otros componentes del sistema de tipo respuesta. Pueden ser reducidas por el desarrollo de repetición de medidas con el sistema de tipo respuesta y promediando las mediciones individuales para estimar el valor real del RTSN para un sitio. El apéndice X1 describe el método de prueba en uso para determinar la magnitud del error de la repetibilidad.

Nota 1. La longitud en uso del sitio o sitios usados para estimar la repetibilidad debe ser igual a la longitud mínima de las secciones de prueba para la evaluación de los sistemas de tipo respuesta. Esto puede requerir sitios de prueba sean más largos que los perfilados para la calibración.

4.3.2 Error de sesgo en la Ecuación de Calibración- Estimaciones del índice de rugosidad estándar estarán sesgadas si la ecuación de calibración es incorrecta o si no se usa la ecuación de calibración. El propósito de esta práctica estándar es reducir el sesgo a un nivel insignificante. Si desea, la magnitud del sesgo restante después de la calibración puede estimarse de los datos colectados en la calibración.

4.3.3 Error Estándar de la Estimación (Error Debido a Interacciones Entre los Efectos del Sitio y los Efectos del Sistema de Tipo Respuesta)- Este error es constante (un sesgo) para una combinación particular del sistema de tipo respuesta y el sitio, pero es aleatorio con la selección del sitio. En última instancia, limita la exactitud de la estimación de la rugosidad estándar de un sitio hecho con un sistema de tipo respuesta. El error puede estimarse de los datos colectados en la calibración.

4.3.3.1 El error estándar de las estimaciones de la estimación del error debido a diferencias físicas en la respuesta entre un particular sistema de tipo respuesta y el índice de rugosidad estándar, puede reducirse por una transformación matemática.

4.3.3.2 Tres variables físicas que son controlables y que influencia el error estándar de la estimación son la velocidad de prueba del vehiculo, rigidez por humedad del amortiguador y la presión del neumático del vehiculo. Par la mayoría de los vehículos, la reproducibilidad máxima de la estimación del índice de rugosidad estándar es obtenida adoptando una velocidad de prueba de 50 MPH (80 KPH), equipando el vehiculo con

amortiguadores rígidos y manteniendo una presión estándar en el neumático. (Ver también 8.2).

4.4 Una verificación periódica es esencial para asegurarse que la calibración sigue siendo válida.

5. Aparatos

5.1 La Calibración de los sistemas de tipo respuesta involucra que el sistema de tipo respuesta sea calibrado y un aparato adicional para medir perfiles longitudinales de los sitios de calibración.

5.2 Sistemas de Tipo Respuesta- Todos los sistemas de tipo respuesta deben satisfacer los requisitos del Método de Prueba E 1082. Cuando un medidor del camino es acoplado en un carro o camioneta, el vehiculo receptor debe satisfacer también los requisitos del Método de Prueba E 1082. Cuando un medidor del camino es acoplado en un remolque, el remolque debe satisfacer los requisitos del Método de Prueba E 1215 y si bien la configuración actual del remolque no es critica, el mismo remolque debe ser usado siempre entre calibraciones.

5.3 Dispositivo de Medición del Perfil en el Pavimento- La medición del perfil longitudinal puede hacerse usando métodos dinámicos o estáticos. El método para medición debe cumplir con los requisitos bajos para la resolución del dato de la elevación y para la precisión y sesgo del cálculo del índice de rugosidad estándar, basándose en las guías del Documento Técnico Nº 46 del Banco Mundial.

5.3.1 Resolución- El método usado para determinar el perfil, medido como una secuencia de puntos de elevación vertical espaciados a intervalos de 12 pulgadas (300 mm) o menores, tendrán una resolución (cambio mínimo visualizado en la salida del dispositivo) dentro de los requisitos mínimos que se muestran abajo:

Rugosidad mínima válida		Resolución Estática	
IRI (pda/milla)	IRI (m/km)	(pda)	(mm)
0	0	≤ 0.01	≤ 0.25
36	0.5	≤ 0.02	≤ 0.50
63	1	≤ 0.04	≤ 1.0
190	3	≤ 0.08	≤ 2.0
317	5	≤ 0.12	≤ 3.0
444	7	≤ 0.16	≤ 4.0

Nota 2. Si el dispositivo de medición del perfil no reúne la resolución requerida en los rangos bajos sobre los cuales se desarrolla la calibración, la calibración no cumplirá normalmente con los requisitos de precisión sobre estos rangos. Al identificar el rango sobre el cuál los requisitos de resolución del perfil no cumplen con esta práctica, deben incluirse en el reporte de calibración.

5.3.2 Precisión del Cálculo del Índice de Rugosidad Estándar- La precisión de los valores del índice de rugosidad estándar calculados a partir del perfil para cada sitio de calibración debe estar dentro de 5% (coeficiente de variación). Cuando se usa un método estático tiene que ser demostrado que se cumple con los requisitos. Cuando se usa un método dinámico la precisión debe determinarse a través de medidas repetitivas.

5.3.3 Sesgo del Cálculo de los Índices de Rugosidad Estándar- La precisión de los valores calculados del índice de rugosidad estándar a partir del perfil debe estar dentro del 5% del índice de rugosidad estándar "real" o dentro del 3.5% del índice de rugosidad estándar determinado por las mediciones de Clase 1 (ver nota 3).

Nota 3. Para propósitos de esta práctica, el cálculo de los valores del índice de rugosidad estándar a partir de las medidas de Clase 1, debe hacerse usando métodos como los que se describen en el Método de Prueba E 1364.

6. Selección de los Sitios de Calibración

6.1 Consideraciones Generales- Está práctica requiere que los sitios de calibración tengan propiedades representativas de rugosidad de los pavimentos que rutinariamente se evalúan con los sistemas de tipo respuesta. Los sitios de calibración tendrán una variación mínima transversalmente en la rugosidad longitudinal, y que tendrá aproximadamente rugosidad constante sobre su longitud. Ubicar los sitios de calibración en pavimentos que no tengan la probabilidad de ser reparados durante el periodo de uso. No seleccionar pavimentos con baches o localización extensa de parches. Marcar los sitios de calibración claramente para que puedan ser fácilmente identificados. Además, todas las mediciones deben hacerse en pavimento seco.

6.2 Número y Longitud de los sitios de Calibración- Todos los sitios deben tener la misma longitud, y que la longitud sea por lo menos 0.2 millas (300 m) y no mayor de 1.0 milla (1600 m). El número de sitios requeridos depende de la longitud, como se muestra abajo:

Longitud del Sitio		Número Mínimo de Sitios
(milla)	(m)	
0.2	300	14
0.3	500	10
1.0	1600	8

Nota 4. La desviación residual estándar asociada con el análisis de regresión mejora mientras que la longitud del sitio aumenta a partir de 0.2 milla (300 m) a 1.0 milla (1600 m).

Nota 5. La longitud de los sitios de la calibración puede ser diferente de la longitud de las secciones típicas de prueba que se evaluaron por el sistema de tipo respuesta.

6.3 Rango de Rugosidad- Seleccionar sitios de calibración que cubran el rango de rugosidad longitudinal encontrada durante el uso normal. La calibración solo es valida

sobre el rango de rugosidad cubierta por los sitios de calibración. Extrapolaciones más allá de este rango no se aconsejan.

6.4 Distribución de Rugosidad Entre Sitios- Este método de calibración requiere una distribución uniforme de la rugosidad entre los sitios de calibración. El apéndice X2 proporciona una guía para seleccionar los sitios para lograr este objetivo.

6.5 Aproximación y Salida del Sitio- Cada sitio de calibración tendrá un una aproximación de por lo menos 300 pies (90 m) de longitud y una porción de salida de por lo menos 50 ft (15 m) de longitud que tenga una rugosidad similar a la rugosidad de los sitios, para asegurar que el sistema de tipo respuesta no este respondiendo a una cierta no uniformidad en la superficie del camino como una entrada en el sitio de calibración y para tomar en cuenta la variación de menor importancia en los puntos que comienzan y que paran al perfilar o al medir su rugosidad. Si otra velocidad de prueba que la de 50 MPH (80 KPH) es adoptada, la longitud mínima de acercamiento debe ajustarse para que corresponda al tiempo de aproximación de por lo menos 4 segundos.

6.6 Geometría- Localizar los sitios de calibración en secciones en tangente de los pavimentos los cuales no incluirán puentes, cruces con vías férreas o intersecciones. Solamente si no se puede evitar, pueden aceptarse caminos con curvaturas suaves uniformes. No debe haber cambios bruscos en el curso en el sitio o en la aproximación.

7. Determinación del Índice de Rugosidad Estándar para los Sitios de Calibración.

7.1 Elección del Índice de Rugosidad Estándar:

7.1.1 Para los sistemas de tipo respuesta con ruedas individuales, es recomendado el IRI. La rueca del remolque del sistema de tipo respuesta debe seguir precisamente la rueda que es perfilada.

7.1.2 Para cualquier sistema de tipo respuesta basada en vehículos de dos trayectorias (por ejemplo, carros de pasajeros, camionetas y remolques con dos rodadas), debe usarse el promedio de IRI en la rodada derecha y del IRI en la rodada izquierda o el HRI.

Nota 6. Para tipos similares de pavimentos, basado en datos disponibles, el HRI y el promedio de IRI en la rodada derecha y en la rodada izquierda tienen correlación. Típicamente, los valores de HRI son menores que los valores promedio de IRI debido a la cancelación de los desplazamientos de la fase de salida de las dos rodadas, con relaciones cercanas a 0.96 para pavimentos rígidos, 0.90 para pavimentos compuestos y 0.80 para pavimentos flexibles y caminos sin pavimentar. La mejor conversión posterior a la calibración de valores de HRI a valores promedio de IRI (que es rugosidad estándar), puede obtenerse como se índica arriba usando factores de conversión específicos para grupos de pavimentos.

7.2 Determinación del Índice de Rugosidad Estándar con un Dispositivo Dinámico de Perfilar. Si un dispositivo inercial de perfilar es usado para medir el perfil de un

pavimento, operar el dispositivo inercial de perfil como se especifica en el Método de Prueba E 950. La mayoría de los sistemas dinámicos de perfilar incluyen un software para de calcular automáticamente uno o más de los índices de rugosidad estándar recomendados. (La disponibilidad del software puede ser un criterio práctico para seleccionar el índice de rugosidad estándar específico). Cuidar que se tome la ubicación del dispositivo perfilador sobre la rodada(s) establecida, cada vez que es medido el perfil longitudinal de un sitio de calibración. Para reducir el efecto del error de la operación aleatoria en esta medición, por lo menos cinco prueba de repetición deben hacerse. El promedio de los valores del índice de rugosidad estándar es usado como el valor de referencia real o índice de rugosidad estándar para la regresión de la calibración.

Nota 7. Repetir la prueba para la estimación del índice de rugosidad estándar puede o no requerirse para otros dispositivos de perfilar y pueden ser tratados por el usuario.

7.3 Medición del Índice de Rugosidad Estándar Usando Métodos de Evaluación de Nivel Estático- El procedimiento descrito en el Método de Prueba E 1364 (mediciones de Clase 1 o Clase 2) será utilizado para obtener el perfil del pavimento usando el método de evaluación de estadal y nivel. Repetir las mediciones generalmente no es requerido si el método incluye una revisión para del error durante la medición y captura de datos. Detalles para calcular el IRI se proporcionan en el apéndice X1 del Método de Prueba E 1364.

7.4 Medición del Índice de Rugosidad Estándar Usando Otros Dispositivos de Perfilar Dinámicos y Estáticos- Otros dispositivos de perfilar (tal como el APL, Dipstick y el dispositivo de perfilar del Sur de Dakota pueden ser usados si cumplen los requisitos de 5.3.

7.5 Determinar el índice de rugosidad estándar para cada sitio de calibración por lo menos cada doce meses. (Mayor frecuencia en la determinación del índice de rugosidad estándar para los sitios de calibración puede requerirse, ver 8.5.2). Durante este período no utilice el sitio de calibración si ha sido alterado por trabajos de mantenimiento o se tiene evidencia que indique que el índice de rugosidad estándar para éste sitio ha cambiado más del 5%.

Nota 8. Cuando sean necesarios nuevos valores de índice de rugosidad estándar, los anteriores sitios pueden ser usados o nuevos sitios pueden ser seleccionados. Su uso anterior no es un factor. De cualquier manera, los nuevos sitios deben cumplir los requisitos de la Sección 6.

7.6 La velocidad de simulación para el índice de rugosidad estándar debe ser 50 MPH (80 KPH), a pesar de la velocidad de prueba usada por el sistema de tipo respuesta.

8. Determinación de los Números de los Sistemas de Tipo Respuesta (RTSNs) para los Sitios de Calibración.

8.1 Remplace los neumáticos o ruedas dañadas en el vehículo receptor del sistema de tipo respuesta y balancee los neumáticos/ruedas ensamblándolas de la manera especificada en el Método de Prueba E 1082 antes de la calibración.

8.2 En orden, para obtener la mejor reproducibilidad y exactitud para evitar errores contribuidos por la histéresis es: equipar el vehiculo receptor del sistema de tipo respuesta con amortiguadores de choque muy rígidos. Si los RTSNs obtenidos en los sitios de calibración son más grandes del 20% en el promedio que el índice de rugosidad estándar en sitios de calibración de moderada rugosidad, entonces los amortiguadores de choque deben remplazarse por amortiguadores de choque más rígidos antes de la calibración. Los RTSNs deben convertirse correctamente a unidades de ingeniería para esta comparación. Las unidades son: pulgadas (metros) totales suspensión acumulada en el recorrido (ambas direcciones) dividida por la distancia recorrida en millas (kilómetros) a 50 MPH (80 KPH). Los amortiguadores de choque montados en los remolques deben cumplir los requisitos de la Especificación E 1215. Recalibrar el sistema de tipo respuesta siempre que los amortiguadores de choque sean remplazados.

8.3 Verificar la exactitud de las lecturas del velocímetro del sistema de tipo respuesta antes de la determinación de los RTSNs para la medición del tiempo requerido de recorrido en un nivel de medición exacto (± 0.1%), en una sección recta del pavimento por lo menos de 0.5 millas (800 m) de longitud a la velocidad constante indicada. Verificar las lecturas del velocímetro a la velocidad o velocidades planeadas que sean incluidas en la calibración. Un mínimo de tres corridas de prueba para cada velocidad debe hacerse para la verificación. La velocidad indicada por el velocímetro debe estar dentro de ± 2 MPH (± 3 KPH) del promedio de medidas distancia/tiempo para los tres recorridos de prueba.

8.4 Verificar la exactitud del equipo medidor de distancia del sistema de tipo respuesta antes de la determinación de los RTSNs determinando la distancia registrada del recorrido en un nivel de medición exacto (± 0.1%), en una sección recta del pavimento por lo menos de 1.0 milla (1600 m) de longitud a la velocidad constante indicada. Verificar la medición de la distancia del equipo a la velocidad o velocidades planeadas que sean incluidas en la calibración. Un mínimo de tres recorridos de prueba debe hacerse para cada velocidad. El promedio indicado de la distancia por el equipo de medición de distancia para los tres recorridos de prueba debe estar dentro del 1.0% de la distancia recorrida real.

8.5 Operar el sistema de tipo respuesta en pavimento seco de la manera especificada en el Método de Prueba E 1082.

8.5.1 Una prueba individual de velocidad es usada durante una calibración simple. Si el sistema de tipo respuesta es operado a diferentes velocidades de prueba una calibración independiente se requiere para cada velocidad.

8.5.2 Es conocido que el perfil y rugosidad del pavimento pueden cambiar en cada temporada y por la hora del día. Para una calibración inicial valida, los perfiles de los sitios de calibración deben ser los mismos cuando se miden con el dispositivo perfilador y cuando se recorren por los sistemas de tipo respuesta.

8.5.3 Para cada sitio de calibración y cada prueba de velocidad, medidas repetidas son hechas con el sistema de tipo respuesta. El siguiente número mínimo de repeticiones son recomendadas en base a la longitud de prueba:

Longitud del Sitio		Repeticiones
(milla)	(m)	
0.2	300	5
0.5	800	3
1.0	1600	3

Dependiendo del particular sistema de tipo respuesta, más repeticiones pueden ser recomendables. El promedio de la repetición de las mediciones para el sitio de calibración es la estimación real del RTSN para cada sitio.

9. Análisis de Regresión y Estimación del Error

9.1 Aplicar un procedimiento estadístico establecido para el menor ajuste de regresión al par de índice de rugosidad estándar y el RTSN obtenido para cada sitio. La regresión debe tratar el índice de rugosidad estándar como la variable dependiente (eje Y) y el RTSN como la variable independiente (eje X). Utilizar la práctica convencional para estimar los intervalos de confianza (estimación de errores) asociada con el contenido futuro de los valores del índice de rugosidad estándar, obtenida por el sistema de tipo respuesta recién calibrado. El apéndice X1 muestra un ejemplo del menor ajuste de regresión aceptable y el procedimiento de la estimación del error el cuál debe ser seguido. Opcionalmente, los intervalos de confianza pueden calcularse por la línea de regresión para estimar la magnitud del error de sesgo restante (ver 4.3.2).

Nota 9. La desviación estándar estimada del índice de rugosidad estándar obtenida con la calibración del sistema de tipo respuesta es aproximadamente la raíz cuadrada de la suma de la variación del error de repetibilidad (ver 4.3.1) y el error estándar de la estimación (ver 4.3.3). Dependiendo del procedimiento de análisis, la desviación estándar del error residual puede ser ya sea la desviación estándar del índice de rugosidad estándar total o la mejor reproducibilidad obtenida con el sistema de tipo respuesta. Si la regresión residual no incluye el error de repetibilidad, el error de repetibilidad puede ser agregado cuando se estimen los intervalos de confianza. (Ver el ejemplo del método de prueba en el Apéndice X1).

10. Verificación de la Calibración del Sistema de Tipo Respuesta

10.1 Se animará al usuario para que periódicamente verifique la ecuación (es). Si la verificación índica que el vehículo ha cambiado y la ecuación de calibración no es más valida, todos los datos obtenidos desde la última verificación son sospechosos. El Apéndice X3 da un ejemplo de un procedimiento de verificación aceptable que puede ser seguido.

Nota 10. Es recomendable que la verificación sea desarrollada por lo menos mensualmente cuando el sistema está en uso o después de cada 2000 millas (3000 km) de operación. Si es posible, un control de revisión diario debe hacerse cuando el sistema está en uso, utilizando unos pocos sitios de control cercanos al área de almacenamiento del equipo.

10.2 La calibración debe dejarse vacía si se realizan cambios al sistema de tipo respuesta que afecten la respuesta a la rugosidad del camino. Tales cambios incluyen, pero no son limitativos, los siguientes: reemplazo de llanta; amortiguadores de choque, otros componentes de la suspensión, vehiculo de remolque (en el caso de que al vehículo se le acople un remolque de tipo respuesta) y daños en el vehículo.

11. Reporte

11.1 El reporte debe contener la siguiente información:

11.1.1 El índice de rugosidad estándar obtenido para cada sitio de calibración.

11.1.2 El tipo de índice de rugosidad estándar obtenido.

11.1.3 El método usado para obtener los índices de rugosidad estándar para los sitios de calibración.

11.1.4 Los rangos de rugosidad indicados en 6.3 sobre los cuales los requisitos de resolución del perfil no se cumplen.

11.1.5 Fecha en que los sitios de calibración fueron perfilados.

11.1.6 Temperatura ambiental al momento en el que los sitios de calibración fueron perfilados.

11.1.7 RTSNs individuales obtenidos para cada sistema de tipo respuesta en cada sitio de calibración.

11.1.8 Velocidad de prueba y presión de la llanta asociada con cada RTSN y la temperatura ambiental al momento de que cada RTSN fue obtenido.

11.1.9 El promedio de RTSN para cada sitio de calibración y para cada velocidad de prueba.

11.1.10 Ecuación de calibración (s) para cada sistema de tipo respuesta calibrado.

11.1.11 Intervalo de confianza (error estimado) asociado con cada ecuación de calibración.

11.1.12 Velocidad de prueba, temperatura (s) de prueba y rango de rugosidad asociado con cada ecuación de calibración.

11.2 Reportar los resultados de todas las pruebas de calibración verificadas.

12. Palabras clave

12.1 Calibración, sistema de tipo respuesta y rugosidad del camino.

APENDICES
(Información no obligatoria)

X1. Calibración de sistemas de tipo respuesta- menor regresión cuadrática y estimación del error.

X1.1 Estimación de la Repetibilidad de un Sistema de Tipo Respuesta. Para una velocidad de prueba, obtener por lo menos diez RTSNs por sitio en al menos dos sitios de prueba. Seleccionar sitios de prueba de una longitud equivalente a la sección más pequeña de prueba a ser evaluada por el sistema de tipo respuesta. Determinar la variación de los RTSNs en cada sitio de prueba y promediar las variaciones obtenidas para determinar la variación asociada con la operación del sistema de tipo respuesta a la velocidad de prueba seleccionada. Tomar la raíz cuadrada de la variación para obtener el error de repetibilidad del sistema de tipo respuesta a la velocidad de prueba.

Nota X1.1 Las secciones de prueba pueden ser sitios de calibración si cumplen los requisitos de longitud de 8.5.3. En este caso, las medidas de repetición usadas para el análisis de regresión pueden también ser utilizadas para estimar la repetibilidad del sistema de tipo respuesta.

X1. 2 Obtención de la Ecuación de Calibración del Sistema de Tipo Respuesta. Obtener al menos el número mínimo de repeticiones de RTSNs especificados en 8.5.3 para cada sitio de calibración. Promediar las repeticiones de RTSNs obtenidas en un sitio para estimar el real RTSN para el sitio a la velocidad de prueba de calibración. Hacer parejas de valores con los principales RTSN obtenidos para cada sitio de calibración con el correspondiente índice de rugosidad estándar para el mismo sitio. Desarrollar un análisis de regresión en todos los resultados apareados para el sistema de tipo respuesta y determinar los coeficientes para una ecuación de la siguiente forma:

$$SRI = A + B\left(RTSN_X\right)$$

Donde:

SRI	Índice de Rugosidad Estándar (IRI, HRI o el promedio del IRI en la rodada derecha y en la rodada izquierda).
$RTSN_x$	El numero del sistema de tipo respuesta obtenido a la velocidad de prueba seleccionada de X millas/h.

Nota X1. 2 La desviación estándar residual asociada con el análisis de regresión mejora cuando el número de repeticiones de las medidas de la rugosidad aumenta de tres a diez.

Nota X1.3 La desviación estándar residual asociada con el análisis de regresión mejora cuando la longitud de los sitios de calibración se incrementa arriba de 1 milla (1.6 km).

Nota X1.4 Para algunos sistemas de tipo respuesta, una mejor forma para la ecuación de regresión es la cuadrática. Ver Documento Técnico 46 del Banco Mundial para detalles de cálculo de la una ecuación de la siguiente forma:

$$SRI = A + B\left(RTSN_X\right) + C\left(RTSN_X^2\right)$$

Una prueba-t puede usarse para determinar la relevancia estadística del termino cuadrático. Si es insignificante, el modelo lineal simple debe ser usado.

Nota X1.5 El valor de intercepción A debe ser considerablemente menor que el valor medio de SRI. Un valor alto de A indica un error sistemático grande en el sistema de tipo respuesta, que hace al dispositivo relativamente insensible a la entrada de la rugosidad del camino y por lo tanto de validez dudosa.

X1.3 Estimación de la Variación Asociada con el Análisis de Regresión. Calcular la desviación estándar residual de los puntos de prueba asociados con la regresión lineal descrita en X1.2. Ajustar la desviación estándar residual para obtener la variación asociada con el análisis de regresión.

X1.4 Estimación del Intervalo de Confianza del 95% para el Sistema de Tipo Respuesta. Calcular la desviación estándar del error del sistema total tomando la raíz cuadrada de la sumatoria de la variación asociada con el análisis de regresión (ver X1.3) y la variación asociada con la repetibilidad del sistema de tipo respuesta (ver X1.1):

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma^2{}_{rep} + \sigma^2{}_{res}}$$

Multiplicar la desviación estándar por dos para obtener una aproximación del 95% del intervalo de confianza (error del sistema de dos-sigma) asociado con la calibración. Una representación gráfica del análisis de regresión se muestra en la figura X1.1 y una tabla de RTSNs, predice valores de SRI, y estimaciones del error se muestran en la tabla X1.1.

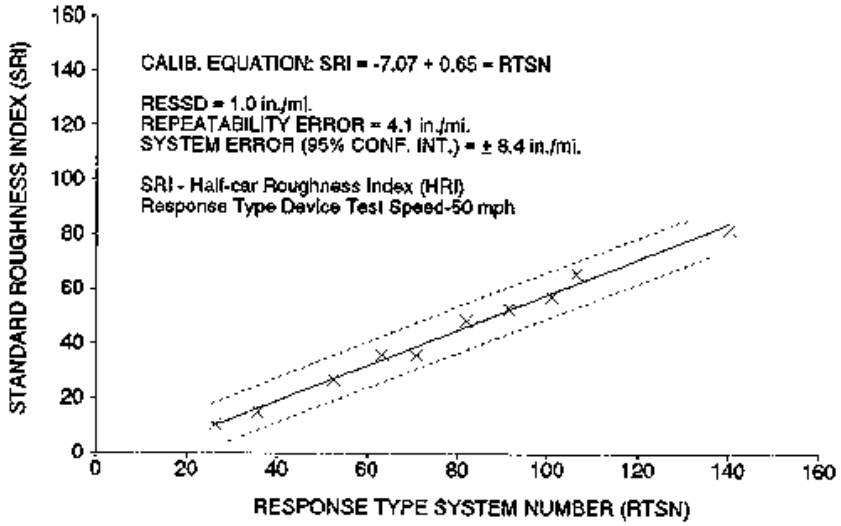


FIG. X1.1 Graph of Sample Regression Analysis

Tabla X1.1 Muestra de Resultados de la Calibración del Sistema Tipo Respuesta

TABLE X1.1 Sample Response-Type System Calibration Results

NOTE 1—One mile = 1.6 km

RTSN in./mile	SRI in./mile	% Error, ±	RTSN in./mile	SRI in./mile	% Error, ±	RTSN in./mile	SRI in./mile	% Error, ±	RTSN in./mile	SRI in./mile	% Error, ±	RTSN in./mile	SRI in./mile	% Error, ±
11	0.1	14000.0	42	20.2	41.6	73	40.4	20.8	104	60.5	13.9	135	80.7	10.4
12	0.7	1163.1	43	20.9	40.3	74	41.0	20.5	105	61.2	13.7	136	81.3	10.3
13	1.4	617.6	44	21.5	39.1	75	41.7	20.2	106	61.8	13.6	137	82.0	10.2
14	2.0	417.9	45	22.2	37.9	76	42.3	19.9	107	62.5	13.4	138	82.6	10.2
15	2.7	315.8	46	22.8	36.8	77	43.0	19.6	108	63.1	13.3	139	83.3	10.1
16	3.3	253.8	47	23.5	35.8	78	43.6	19.3	109	63.8	13.2	140	83.9	10.0
17	4.0	212.1	48	24.1	34.8	79	44.3	19.0	110	64.4	13.0	141	84.6	9.9
18	4.6	182.2	49	24.8	33.9	80	44.9	18.7	111	65.1	12.9	142	85.2	9.9
19	5.3	159.7	50	25.4	33.1	81	45.6	18.4	112	65.7	12.8	143	85.9	9.8
20	5.9	142.1	51	26.1	32.2	82	46.2	18.2	113	66.4	12.7	144	86.5	9.7
21	6.6	128.0	52	26.7	31.4	83	46.9	17.9	114	67.0	12.5	145	87.2	9.6
22	7.2	116.5	53	27.4	30.7	84	47.5	17.7	115	67.7	12.4	146	87.8	9.6
23	7.9	106.9	54	28.0	30.0	85	48.2	17.4	116	68.3	12.3	147	88.5	9.5
24	8.5	98.7	55	28.7	29.3	86	48.8	17.2	117	69.0	12.2	148	89.1	9.4
25	9.2	91.7	56	29.3	28.7	87	49.5	17.0	118	69.6	12.1	149	89.8	9.4
26	9.8	85.6	57	30.0	28.0	88	50.1	16.8	119	70.3	12.0	150	90.4	9.3
27	10.5	80.3	58	30.6	27.4	89	50.8	16.5	120	70.9	11.8	151	91.1	9.2
28	11.1	75.6	59	31.3	26.9	90	51.4	16.3	121	71.6	11.7	152	91.7	9.2
29	11.8	71.4	60	31.9	26.3	91	52.1	16.1	122	72.2	11.6	153	92.4	9.1
30	12.4	67.7	61	32.6	25.8	92	52.7	15.9	123	72.9	11.5	154	93.0	9.0
31	13.1	64.3	62	33.2	25.3	93	53.4	15.7	124	73.5	11.4	155	93.7	9.0
32	13.7	61.3	63	33.9	24.8	94	54.0	15.6	125	74.2	11.3	156	94.3	8.9
33	14.4	58.5	64	34.5	24.3	95	54.7	15.4	126	74.8	11.2	157	95.0	8.8
34	15.0	56.0	65	35.2	23.9	96	55.3	15.2	127	75.5	11.1	158	95.6	8.8
35	15.7	53.6	66	35.8	23.5	97	56.0	15.0	128	76.1	11.0	159	96.3	8.7
36	16.3	51.5	67	36.5	23.0	98	56.6	14.8	129	76.8	10.9	160	96.9	8.7
37	17.0	49.5	68	37.1	22.6	99	57.3	14.7	130	77.4	10.9	...	...	...
38	17.6	47.7	69	37.8	22.2	100	57.9	14.5	131	78.1	10.8	...	...	...
39	18.3	46.0	70	38.4	21.9	101	58.6	14.3	132	78.7	10.7	...	...	...
40	18.9	44.4	71	39.1	21.5	102	59.2	14.2	133	79.4	10.6	...	...	...
41	19.6	42.9	72	39.7	21.2	103	59.9	14.0	134	80.0	10.5	...	...	...

X2. Selección de los sitios de calibración

X2.1 Primero, identificar el rango de datos sin corregir de RTSN esperados durante la operación normal, para determinar el rango requerido para la calibración. Dividir este rango en tres o más intervalos de rugosidad, de lisos a rugosos. Si el sistema de tipo respuesta es usado principalmente en caminos que caen en una banda estrecha de rugosidad, tres intervalos son suficientes. Si es usado para un amplio rango de condiciones, más de tres sea preferible. En términos de valores calibrados de IRI, los intervalos no deben ser más pequeños que 30 pulgadas/milla y no más grandes de 100 pulgadas/milla. Los sitios de calibración candidatos serán medidos con el sistema de tipo respuesta. Los sitios son seleccionados de manera que cada categoría de rugosidad sea representada igualmente.

X2.2 Este método se ilustra por un ejemplo. Considerar un sistema de tipo respuesta que es usado en todas las carreteras públicas y el cuál ha tenido anteriormente producción de lecturas incorrectas que se desarrollan de 5 conteos por milla a 60 conteos por milla. Quince sitios de 0.5 millas de longitud serán usados para la calibración. El rango de la rugosidad tomada por el sistema se considera que sea ampliada por el usuario y cinco intervalos de rugosidad se piensa que son apropiados. Esto es, cada intervalo tiene un rango de 11 conteos por milla ((60-5)/5). Los rangos para cada intervalo son definidos como sigue:

Intervalo	Rango de Rugosidad (Unidades sin “Tratar” de conteos por milla)
1	5 a 16
2	16 a 27
3	27 a 38
4	38 a 49
5	49 a 60

X2. 3 Después de la calibración, se encuentra que el rango de rugosidad de los sitios de prueba cubren realmente niveles de rugosidad de IRI de 50 a 250 pulgadas/milla. También se encuentra que varios de los sitios están clasificados diferentemente por el índice de rugosidad estándar y el RTSN. Sin embargo, la distribución de rugosidad de los sitios es aproximadamente uniforme con el IRI.

X3. Calibración del sistema de tipo respuesta-proceso de verificación de la ecuación

X3.1 Características y Selección de los Sitios de Control. Para una verificación de la calibración de rutina seleccionar por lo menos tres sitios de control, un sitio a la mitad y por lo menos un sitio que este abajo y arriba del rango de rugosidad de calibración descrito en 6.3. Los sitios seleccionados deben tener por lo menos 0.2 millas (0.32 km) de longitud y cumplir los requisitos de 6.1, 6.5 y 6.6.

Nota X3.1 Los sitios de control deben establecerse en un área cercana a la operación del sistema de tipo respuesta. Si el sistema de tipo respuesta está siendo operado cerca de los

sitios de calibración, entonces tres sitios de calibración pueden ser usados como sitios de control.

X3.2 Obtención Inicial de los Números de Medición del Camino para los Sitios de Control. Después de una semana de la calibración, obtener cinco números de medición del camino para cada sitio de control operando el sistema de tipo respuesta de la manera especificada en el Método de Prueba E 1082.

Nota X3.2 La operación de dos o más sistemas de tipo respuesta en los mismos sitios de control es recomendable y proporcionará un indicador de si el sistema de tipo respuesta o los sitios de control han cambiado con el tiempo. Si los resultados de dos o tres sistemas de tipo respuesta están por arriba de los límites aceptables en la misma dirección al mismo tiempo, se tiene fuerte evidencia de que las características de la rugosidad de los sitios de control ha cambiado y que las ecuaciones de calibración para los sistemas de tipo respuesta siguen siendo válidas. Si solamente se usa un sistema de tipo respuesta y los resultados están por arriba de los límites aceptables, se asume que el sitio del control no ha cambiado a menos que allí exista evidencia física que indique lo contrario y que la ecuación de calibración del sistema de tipo respuesta no sea más valida.

X3.3 Pruebas Rutinarias de Control

X.3.3.1 En el intervalo deseado (ver 10) obtener cinco números de medición del camino en cada sitio de control con el mismo sistema (s) de tipo respuesta usado en X3.2 y preparar las cartas de control del rango y media de los números de medición del camino obtenidos como se describe en X3.4.

X.3.3.2 Si los resultados de cualquiera de la pruebas de control están por arriba de los límites aceptables, no aplicar la ecuación (s) de calibración para el sistema de tipo respuesta en ecuación (ver nota X3.2). Recalibrar el sistema de tipo respuesta como se describe en las secciones 8 y 9 y establecer una nueva ecuación (s) de calibración. Después de recalibrar, repetir la ecuación de calibración verificando los procedimientos descritos en X3.2 y X3.3.

Nota X3.3 Antes de recalibrar, revisar el sistema de tipo respuesta a fondo y considerar remplazar los amortiguadores, llantas o partes de la suspensión tal como juntas de rótula y rodamientos de la rueda. Remplace cualquiera de estos componentes dejando la calibración actual sin llenar, esta es la mejor manera de hacer los cambios justo antes de la calibración.

X3.4 Elaborando las Cartas de Control Sigma-Tres (n=5), Media $\overline{X}$ y Rango R.

X3.4.1 Este apéndice asume que un sistema de valores observados de una variable X se subdivide en subgrupos racionales k (muestras), cada subgrupo contiene n=5 de valores observados. (Ver ASTM STP 15 D o Manual NIST 91).

X3.4.2 El rango R de una muestra es la diferencia entre la observación más grande y la observación más pequeña.

X3.4.3 Para muestra de tamaño n=5, las líneas de las cartas de control son las siguientes (ver tabla X3.1):

Tabla X3.1 Factores para Calcular los Límites de Control Sigma-Tres

Número de Observaciones en la Muestra, n	Factores para los Límites de Control		
	A_2	D_3	D_4
2	1.880	0	3.267
3	1.023	0	2.575
4	0.729	0	2.282
5	0.577	0	2.115
6	0.483	0	2.004
7	0.419	0.076	1.924
8	0.373	0.136	1.864
9	0.337	0.184	1.816
10	0.308	0.223	1.777

FORMULAS

	Línea Central	Límites de Control Sigma-Tres
Carta de Promedios	$\overline{\overline{X}}$	$\overline{\overline{X}} \pm A_2 \overline{R}$
Carta de Rangos	$\overline{R}$	$D_3 \overline{R}$ y $D_4 \overline{R}$

	Línea Central	Límites de Control Sigma-Tres
Para Promedios	$\overline{\overline{X}}$	$\overline{\overline{X}} \pm 0.577 \overline{R}$
Para Rangos	$\overline{R}$	2.115 $\overline{R}$ (arriba) y 0 (abajo)

Donde:

$\overline{\overline{X}}$ | El gran promedio de valores observados de X para todas las muestras:

$$\frac{n_1 \overline{X}_1 + n_2 \overline{X}_2 + n_3 \overline{X}_3 + n_4 \overline{X}_4 + n_5 \overline{X}_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5}$$

y

$\overline{R}$ | Valor promedio del Rango R para las muestras individuales *k*:

$$\left(R_1 + R_2 + ... + R_k\right) / k$$

X.3.4.4 La figura X3.1 muestra las cartas de control para X y R basadas en el sistema de datos de la muestra presentada en la tabla X3.2 para el sexto mes de prueba. Las cartas indican que la unidad probada debe ser recalibrada. Cartas similares a las mostradas deben prepararse después de cada prueba de verificación.

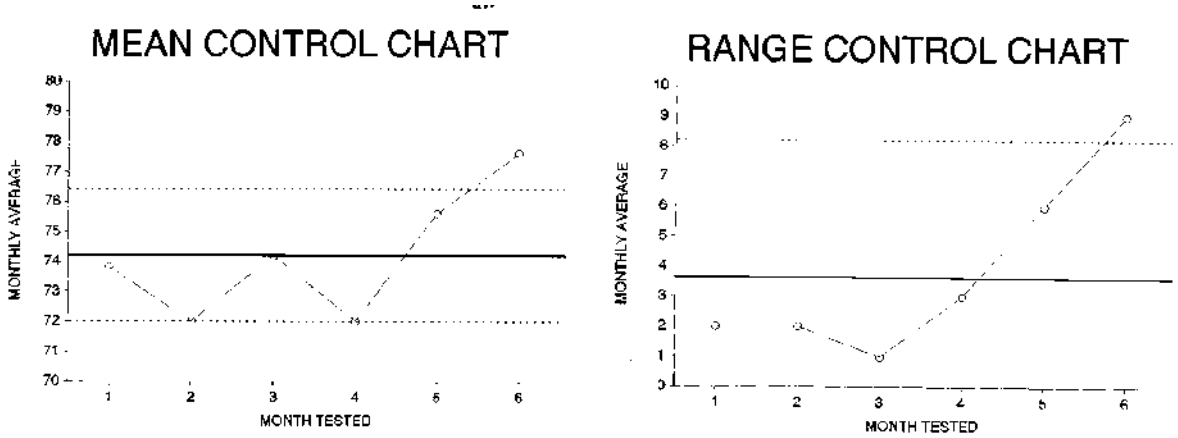


FIG. X3.1 Sample Mean and Range Control Charts

TABLE X3.2 Sample Data Set

Month Tested	Road Meter Numbers					Mean Control Chart				Range Control Chart			
	1	2	3	4	5	$\bar{X}$	$\bar{X}$	UL	LL	R	$\bar{R}$	UL	LL
1	73	73	73	75	75	73.8	...	...	...	2	...	...	...
2	71	72	72	72	73	72.0	72.9	74.1	71.7	2	2.0	4.2	0
3	74	74	74	74	75	74.2	73.3	74.3	72.3	1	1.7	3.5	0
4	71	71	71	73	74	72.0	73.0	74.2	71.8	3	2.0	4.2	0
5	78	78	76	74	72	75.6	73.5	75.1	71.9	6	2.8	5.9	0
6	80	82	75	73	78	77.6	74.2	76.4	72.0	9	3.8	8.1	0

ANEXO IV ASTM 1926-98

MÉTODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL DE CAMINOS A PARTIR DE LAS MEDICIONES DEL PERFIL LONGITUDINAL

1. Alcance

1.1 Esta práctica cubre el procesamiento matemático de las mediciones del perfil longitudinal para producir la estadística de la rugosidad del camino llamada Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

1.2 La intención es proporcionar una práctica estándar para calcular y reportar una estimación de la rugosidad del camino para pavimentos carreteros .

1.3 Esta práctica se basa en el algoritmo desarrollado en el Experimento Internacional de la Rugosidad del Camino patrocinado por un número de instituciones, incluido el Banco Mundial y reportado en dos Documentos Técnicos del Banco Mundial. Información Técnica Adicional se proporciona en dos Documentos del TRB.

1.4 Los valores establecidos en unidades SI pueden ser tomados como estándar. Las unidades pulgada-libra se dan en paréntesis solamente como información.

1.5 Esta estandarización, no tiene el propósito de agregar todo lo concerniente a la seguridad, si cualquiera, asociada con este uso. Es responsabilidad de el usuario de ésta estandarización establecer practicas apropiadas de seguridad y salud en la determinación aplicada de limitaciones reguladas para este uso.

2. Referencias

2.1 Estándares ASTM:

E 177 Práctica para el Uso de los Términos de Precisión y Sesgo en los Métodos de Prueba ASTM.

E 867 Terminología Relacionada con las Características de Superficies Recorridas.

E 950 Método de Prueba para Medir el Perfil Longitudinal de Superficie Recorridas con un Perfilador que Establece cómo Referencia un Acelerómetro inercial.

E 1082 Método de Prueba para medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de una Superficie Recorrida.

E 1170 Prácticas para Simular la Respuesta Vehicular a la Superficie Recorrida de Perfiles longitudinales.

E 1215 Especificaciones para Remolques Usados para Medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de los Caminos.

E 1364 Método de Prueba Estándar para medir la rugosidad de caminos por el Método de Nivel Estático.

E 1656 Guía para la Clasificación del Equipo Automatizado para la Evaluación de la Condición del Pavimento.

3. Terminología

3.1 Definiciones

3.1.1 La terminología usada en esta práctica se encuentra conforme a las definiciones incluidas en la Terminología E 867.

3.2 Definición de Términos Específicos para esta Estandarización:

3.2.1 Índice de rugosidad internacional (IRI)- Un índice calculado de la medición de perfil longitudinal usando el modelo de cuarto de carro (ver la práctica E 1170) a una velocidad de simulación de 80 KPH (50 MPH).

3.2.1.1 Discusión. El IRI se reporta en metros por kilómetro (m/km) o pulgadas por milla (pulgada/milla). Nota: 1 m/km = 63.36 pulgada/milla.

3.2.2. Medición del Perfil Longitudinal, n. Una serie de valores de elevación tomados a intervalos constantes a lo largo de una rodada.

3.2.2.1 Discusión. Las mediciones de elevación pueden tomarse estáticamente, como con estadal y nivel (ver Método de Prueba E 1364 o inclinómetro, como con perfilador inercial (ver Método de Prueba E 950).

3.2.3 Índice de Rugosidad Medio (MRI), n. El promedio de los valores del Índice de Rugosidad Internacional para la rodada izquierda y derecha.

3.2.3.1 Discusión. Las unidades son en metros por kilómetro o en pulgadas por milla.

3.2.4 Rugosidad superficial recorrida. Las desviaciones de la superficie a partir de una superficie plana real con dimensiones características que afectan las dinámicas del vehiculo, calidad del viaje, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, perfil longitudinal, perfil transversal y pendiente cruzada.

3.2.5 Índice de rugosidad internacional real, n. El valor del Índice de Rugosidad Internacional que será calculado de la medición de un perfil longitudinal con el intervalo constante cercano a cero.

3.2.6 Número de onda, n. El inverso de longitud de onda.

3.2.6.1 Discusión. El número de onda, algunas veces llamado frecuencia espacial, típicamente tiene unidades de ciclos/m o ciclos/pie.

3.2.7 Rodada, n. Una línea o trayectoria que es seguida por el neumático de un vehículo en el camino en el recorrido de una superficie.

4. Resumen de la Práctica

4.1 La práctica presentada fue desarrollada específicamente para la estimación de la rugosidad de un camino a partir de las mediciones de un perfil longitudinal.

4.2 Las mediciones del perfil longitudinal para una rodada son transformadas matemáticamente por un programa de computo y acumulado para obtener el IRI. El perfil debe ser representado como una serie de valores de elevación tomados intervalos constantes a los largo de la rodada.

4.3 La escala del IRI inicia en cero para un camino con ninguna rugosidad y tiene números positivos que se incrementan en proporción a la rugosidad. La figura 1 asocia valores típicos de IRI con descripciones del Documento Técnico 46 del Banco Mundial para caminos con pavimento bituminoso y la figura 2 muestra asociaciones similares para caminos con superficies de tierra o grava.

5. Significado y Uso

5.1 Esta práctica proporciona una forma de obtener una estimación cuantitativa de las propiedades de un pavimento definidas como rugosidad usando un equipo de medición de perfil longitudinal.

RUGOSIDAD
IRI (m/km)

0	
	Viaje confortable arriba de 120 KPH. Ondulaciones apenas perceptibles a 80 KPH en un rango de 1.3 a 1.8. No hay depresiones, baches o corrugaciones que sean perceptibles; depresiones < 2mm/3m. Asfalto típico de alta calidad de 1.4 a 2.3, tratamiento superficial de alta calidad de 2.0 a 3.0.
2	
	Viaje confortable hasta 100-120 KPH. En 80 KPH, movimientos moderadamente perceptibles o las ondulaciones grandes pueden ser filtradas. Superficie defectuosa; depresiones ocasionales, parches o baches (e.g. 5-15 mm/3 m o 10-20 mm/ 5 m con frecuencia de 2-1 por 50 m), o muchos baches superficiales (e.g. en tratamientos superficiales se observan desprendimientos extensos). Superficies sin defectos; moderadas corrugaciones o ondulaciones grandes.
4	
6	Viaje confortable hasta 70-90 KPH, movimientos fuertemente perceptibles y sacudidas. Usualmente asociados con defectos; moderada frecuencia y depresiones irregulares o parches (e.g. 15-20 mm/3 m o 20-40 mm/5 m con frecuencia de 5-3 por 50 m) o baches ocasionales (e.g. 3-1 por 50 m). Superficie sin defectos; ondulaciones o corrugaciones fuertes.
8	Viaje confortable hasta 50-60 KPH, movimientos agudos frecuentes o sacudidas. Asociados con defectos severos; frecuentes depresiones profundas y desiguales y parches (e.g. 20-40 mm/3 m o 40-80 mm/5 m con frecuencia de 5-3 por 50 m) o baches frecuentes (e.g. 4-6 por 50 m).

	10	Es necesario reducir la velocidad debajo de 50 KPH. Muchas depresiones profundas, baches y desintegraciones severas (e.g. 40-80 mm de profundidad con frecuencia de 8-16 por 50 m).

Figura 1. Escala de Estimación de la Rugosidad del Camino para Pavimentos de Concreto Asfáltico o Tratamiento Superficial (Riego de Sello).

RUGOSIDAD
IRI (m/km)

	0	Superficie recientemente aplanada de grava fina, o superficie de suelo con excelente perfil longitudinal y transversal (usualmente se encuentra solamente en una longitud corta).
	2	
	4	Viaje confortable hasta 80-100 KPH, se perciben ondulaciones o sacudidas suaves. Depresiones insignificantes (e.g. < 5 mm/3 m) y sin baches.
	6	
	8	Viaje confortable hasta 70-80 KPH, se perciben movimientos agudos y algunos botes de la rueda. Depresiones frecuentes de tipo bajo o baches superficiales (e.g. 6-30 mm/3 m con frecuencia de 5-10 por 50 m). Corrugaciones moderadas (e.g. 6-20 mm/0.7-1.7 m).
	10	
	12	Viaje confortable a 50 KPH (o 40-70 KPH en secciones específicas). Depresiones transversales moderadas frecuentes (e.g. 20-40 mm/3-5 m) o depresiones profundas ocasionales o baches (e.g. 40-80 mm/3 m con frecuencia menor de 5 por 50 m). Fuertes corrugaciones (e.g. 20 mm//0.7-1.5 m).
	14	
	16	Viaja confortable a 30-40 KPH. Depresiones transversales profundas frecuentes y/o baches (e.g. 40-80 mm con frecuencia de 5-10 por 50 m); o varias depresiones profundas ocasionales (e.g. 80 mm/1-5 m con frecuencia menor de 5 por 50 m) con otras depresiones superficiales. No es posible evitar todas las depresiones excepto las peores.
	18	
	20	Viaje confortable a 20-30 KPH. Velocidades superiores que 40-50 KPH pueden causar incomodidad extrema y posibles daños al carro. En un perfil general bueno; depresiones profundas frecuentes y/o baches (e.g. 40-80 mm/1-5 m con frecuencia de 10-15 por 50 m) y varias depresiones profundas ocasionales (e.g. > 80 mm/0.6-2 m). En un perfil general pobre; defectos moderados y depresiones frecuentes (e.g. superficie de tierra pobre).
	22	

Figura 2. Escala de Estimación de la Rugosidad para Caminos sin Pavimentar con Superficies de Grava o Tierra.

5.1.1 El IRI es transportable debido a que puede ser obtenido de los perfiles longitudinales obtenidos con una variedad de instrumentos.

5.1.2 El IRI es estable con el tiempo porqué el IRI real se basa en el concepto de un perfil longitudinal real, más que las propiedades físicas de un tipo de instrumento en particular.

5.2 La información de rugosidad es útil aportación a los Sistemas de Administración de Pavimentos para las agencias de mantenimiento y transportación.

5.2.1 El IRI para la rodada derecha es la medición de la rugosidad específica de la superficie del camino para la Administración Federal de Carreteras (FHWA) como la entrada al Sistema de Monitoreo del Comportamiento de las Carreteras (HPMS).

5.2.2 Cuando se miden perfiles simultáneamente en el recorrido de ambas rodadas, entonces el MRI (promedio del IRI para cada perfil) es considerado que es la mejor medida de la rugosidad superficial del camino que el IRI para cualquier rodada.

Nota 1. La escala del MRI es idéntica a la escala del IRI.

5.3 El IRI puede interpretarse como la salida de un sistema idealizado de medición de tipo respuesta (ver Método de Prueba E 1082 y la Especificación E 1215), donde la instrumentación y vehículos físicos son remplazados por un modelo matemático. Las unidades de la pendiente corresponden a movimientos acumulados de la suspensión (por ejemplo, metros), divididos por la distancia recorrida (por ejemplo, kilómetros).

5.4 El IRI es una referencia útil para la calibración de sistemas de tipo respuesta que estiman la rugosidad por la medición de la respuesta vehicular (ver Método de Prueba E 1082 y la Especificación 1215).

5.5 El IRI puede interpretarse como la pendiente absoluta promedio del perfil, filtrada matemáticamente para modificar las amplitudes asociadas con diferentes longitudes de onda.

6. Medición del Perfil Longitudinal

6.1 Las mediciones del perfil longitudinal pueden obtenerse de un equipo que opere en un rango de velocidades de estático a velocidades de tráfico de carreteras.

6.2 El equipo que mide la elevación perfil que sirve para recoger los datos del perfil longitudinal, usado en esta practica, debe tener la suficiente exactitud para medir los atributos del perfil longitudinal que son esenciales para calcular el Índice de Rugosidad Internacional.

6.2.1 Una onda de repetición del seno de las siguientes longitudes de onda y amplitudes de pico a pico en ausencia de cualquier otra rugosidad del perfil que produzca los siguientes valores del IRI:

Amplitud (mm)	Longitud de Onda (m)	IRI (m/km)
25.4	91.4	0.0222

Amplitud (pda)	Longitud de Onda (pie)	IRI (pda/milla)
1.00	300	1.42

7. Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

7.1 Esta práctica consiste del cálculo del IRI a partir de un algoritmo desarrollado en el Experimento Internacional de la Rugosidad del Camino, descrito en los Documentos Técnicos 45 y 46 del Banco Mundial. Información Técnica Adicional se proporciona en dos Documentos del TRB.

7.2 Una versión en FORTRAN de este algoritmo ha sido implementado como se describe en la referencia 3.

7.2.1 Esta practica presenta una muestra del programa de computo “IRISMP” para el cálculo del IRI a partir de las mediciones grabadas del perfil longitudinal.

7.2.1.1 El programa de computo IRISMP es en general un programa de computo que acepta un grupo de datos de elevación del perfil como entrada y entonces calcula los valores del IRI ese grupo de datos del perfil.

7.2.1.2 Un listado del programa de computo IRISMP para el cálculo del IRI se incluye en esta practica en el Apéndice X1.

7.2.1.3 Unas disposiciones fueron hechas en el listado del programa de computo (Apéndice X1) para que el cálculo del IRI a partir de las mediciones grabadas del perfil longitudinal se hiciera en unidades SI o pulgada-libra.

7.2.2 La entrada para la muestra del programa de computo del IRI es en un grupo de datos del perfil en ASCII almacenados en un formato de Fortran 1X, F8.3,1X , F8.3. En este formato, los datos del perfil aparecen como una multi-fila, serie de dos columnas con los datos de los puntos del perfil de la rodada izquierda en la Columna 1 y los puntos de la rodada derecha en la Columna 2. El intervalo del punto de los datos del perfil es discrecional. Sin embargo, la calidad de los valores de IRI calculados por este algoritmo es una función del intervalo del punto de los datos.

7.2.2.1 Si la entrada para el programa de cómputo del IRI es en unidades SI, los puntos de los datos de la elevación del perfil son escalados a milímetros con el menor dígito significativo igual a 0.001 mm.

7.2.2.2 Si la entrada para el programa de computo del IRI es en unidades de pulgada-libra, los puntos de los datos de la elevación del perfil son escalados a pulgadas con el menor dígito significativo igual a 0.001 pulgada.

7.3 La distancia del intervalo sobre la cuál es calculado el IRI es discrecional, pero se reportara junto con los resultados de IRI.

7.4 Se requiere una validación del programa del IRI cuando es instalado. Disposiciones para la validación de la instalación del programa del IRI se proporcionan en esta práctica.

7.4.1 La muestra del grupo de datos del perfil TRIPULSE.ASC se proporciona en unidades SI en el Apéndice X2 para validar la instalación del programa de computo.

7.4.2 Usando la muestra del grupo de datos TRIPULSE.ASC (Apéndice X.2) como entradas para el programa de computo del IRI (Apéndice X1), un IRI de 4.42 mm/m fue calculado como se muestra en el Apéndice X3 para un intervalo de punto de los datos del perfil de 0.15 m (0.5 pie) y una distancia del intervalo igual a 15 m del grupo de datos del perfil.

8. Reporte

8.1 Incluir en el reporte para esta practica la siguiente información:

8.1.1 Dispositivo de Medición del Perfil. La Clase del dispositivo de medición del perfil usado debe ser incluida en el reporte para hacer la medición del perfil como se define en el Método de Prueba E 950 y Método de Prueba E 1364.

8.1.2 Mediciones del Perfil Longitudinal. El reporte de los datos del proceso de medición del perfil debe incluir el día y la hora de la medición, el sitio de la medición, la línea medida, la dirección de la medición, longitud de la medición, y la descripción de los puntos de inicio y termino de la medición. El registro de las rodadas (izquierdas, derechas o ambas) debe incluirse.

8.1.3 Resolución del IRI. El número de dígitos después del punto decimal depende de las unidades seleccionadas. Si las unidades son en m/km, entonces los resultados deben reportarse con dos dígitos después del punto decimal. Si las unidades son en pulgada/milla, entonces los resultados del IRI deben reportarse con una resolución de 0.1 pulgada/milla.

9. Precisión y Sesgo

9.1 La precisión y Sesgo del cálculo del IRI esta limitada por los procedimientos usados en el proceso de medición del perfil longitudinal. Las guías para la medición del perfil longitudinal se proporcionan en el Método de Prueba E 950 y Método de Prueba E 1364.

9.2 Para efectos de la precisión y sesgo del perfil medido en el cálculo del IRI, ver la precisión y sesgo en el Apéndice X1.

10. Palabras Clave

10.1 El sistema de monitoreo del comportamiento de las carreteras, HPMS; índice de rugosidad internacional, IRI; perfil longitudinal; sistemas de administración de pavimentos, PMS; rugosidad del pavimento.

ANEXO V ASTM E 1274-88

MÉTODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA MEDIR LA RUGOSIDAD DEL PAVIMENTO USANDO UN PERFILÓGRAFO

1. Alcance.

1.1 Este método de prueba cubre la medición de la rugosidad del pavimento utilizando un perfilógrafo multi-llantas articulado de por lo menos 7 metros de largo (la figura 1 es típica).

1.2 Este método de prueba utiliza un registro de superficie moviendo el perfilógrafo longitudinalmente sobre el pavimento a menos de 5 kilómetros por hora. El registro es analizado para determinar el grado de rugosidad y para identificar protuberancias que excedan un umbral especificado.

1.3 Los valores establecidos en unidades de pulgada-libra deben considerarse como normalizados.

1.4 Esta norma no pretende tomar en cuenta todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar previo a su uso la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias. Véase la Sección 6 para manifestación específica de riesgo.

2. Documento de Referencia.

2.1 Anexo de la ASTM:

E 1274 Método de Prueba para Medir la Rugosidad del Pavimento Utilizando un Perfilógrafo (libro anual de las Normas ASTM. Vol. 04.03)

3. Terminología.

3.1 Descripción de los términos específicos a esta Norma:

3.1.1 Banda en Blanco. Una banda de altura uniforme con su centro longitudinal posicionado óptimamente entre los puntos altos y bajos del registro de la superficie, representando al menos 30 metros de pavimento (véase la figura 2).

3.1.2 Corte de altura. Una distancia especificada de una altura en el registro de la superficie desde una cuerda que representa 7.5 m en la escala longitudinal. La cuerda puede representar menos de 7.5 m si está desde los bajos que se encuentran a cada lado del alto (véase la figura 2).

3.1.3 Tasa de rugosidad. Es la suma de la rugosidad, dividida entre la distancia longitudinal cubierta por la banda en blanco.

3.1.4 Rugosidad. Altura de cada festón continuo redondeada al milímetro más cercano, excepto aquellos menores que 0.8 milímetros verticalmente y 0.6 metros longitudinalmente.

3.1.5 Ondas. Trazos del registro de la superficie arriba y abajo de la banda en blanco (véase la figura 2).

4. Significado y Uso.

4.1 Este método de prueba proporciona un medio para medir la rugosidad de pavimentos nuevos o rehabilitados. Los resultados pueden diferir entre perfilógrafos de diferentes diseños y por lo tanto no estarán de acuerdo necesariamente con las mediciones de rugosidad hechas con otros perfilógrafos u otros equipos para medir la rugosidad.

5. Aparato

5.1 Perfilógrafos:

5.1.1 Con llantas espaciadas uniformemente. Es una plataforma de referencia compuesta de tramos articulados por miembros rígidos o armaduras, de modo que todas las llantas soporten al perfilógrafo. Debe haber por lo menos doce llantas de plataforma de referencia y los ejes de estas llantas deben estar uniformemente espaciados en toda la longitud efectiva del perfilógrafo. La longitud efectiva debe ser de al menos 7 m. Al centro de la plataforma de referencia se localizará una llanta sensora superficial y una grabadora. El diámetro de la llanta sensora debe ser de por lo menos 150 milímetros. Si la grabadora es gráfica, sus escalas deben ser 1:1 verticalmente y 1:300 longitudinalmente (1 cm = 3 m). Si la grabadora es digital, debe mostrar 5 veces/distancia longitudinal de viaje y grabar la altura relativa de la superficie al menos al cuarto de milímetro más cercano.

5.1.2 Con Llantas Espaciadas No Uniformemente. Debe ser como fue descrito en el punto 5.1.1, excepto que los ejes de las llantas de la plataforma de referencia no estén uniformemente espaciados pero que se encuentren separados por lo menos 0.3 m, de manera que no crucen dos llantas la misma irregularidad al mismo tiempo. La grabadora puede localizarse en cualquier lugar pero el equipo sensor de superficie debe localizarse en el centro de la plataforma de referencia. Un aparato común con llantas espaciadas no uniformemente es el perfilógrafo de California (véase 2.1).

5.1.3 Existen diferencias en las respuestas de frecuencia entre perfilógrafos con llantas uniformemente espaciadas y perfilógrafos con llantas espaciadas no uniformemente (véase la figura 3).

5.2 Plantilla de Banda en Blanco (opcional). Tira de plástico transparente de aproximadamente 50 mm de ancho y por lo menos 100 mm de largo. Una longitud común es de 536.4 mm. El centro de la plantilla tiene marcado con una franja opaca el

ancho de la banda en blanco estipulada, en toda su longitud, y con líneas a cada 2 mm arriba y abajo de la banda en blanco.

5.3 Plantilla de Altura Excesiva (opcional). Pieza de plástico transparente marcada con una línea de 25 $\pm$ 0.5 mm que es la distancia de corte de altura estipulada desde una orilla recta de la plantilla. Pueden perforarse dos pequeños agujeros para fijar los extremos de la línea (véase la figura 2).

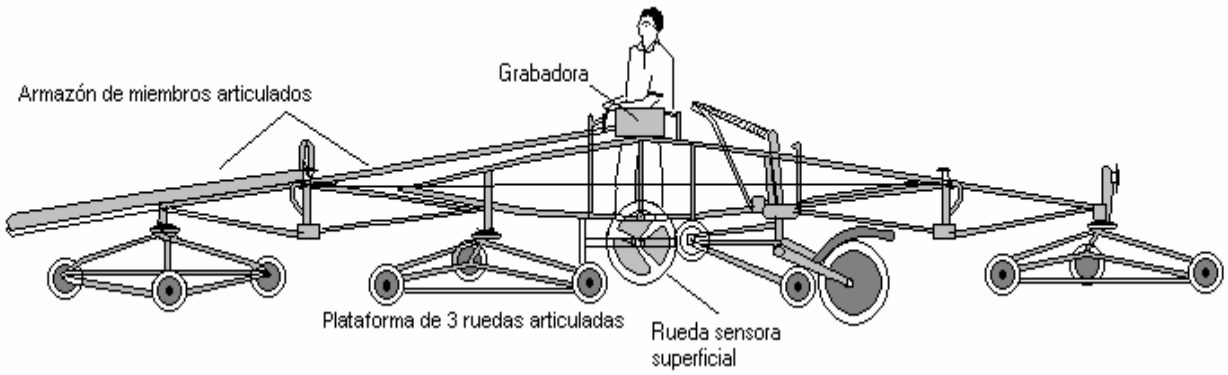
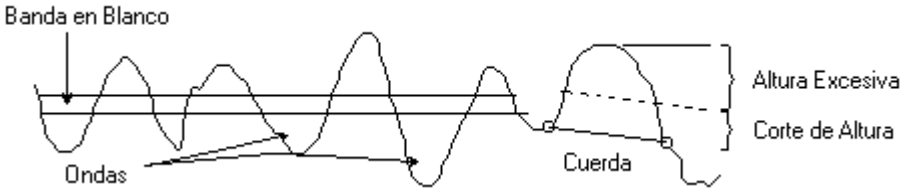


Figura 1. Perfilógrafo



Nota: La figura 2 es gráfica para lectura visual. Puede ser digital para manejarla en computadora

Figura 2. Registro de la Superficie

6. Riesgos.

6.1 Ya que los perfilógrafos en la etapa de prueba se mueven cuando mucho a 5 Km/n., no operan cerca del tránsito sin dispositivos apropiados de control del tránsito y utilizan procedimientos que garantizan la seguridad de los trabajadores y del público.

7. Muestreo.

7.1 Tómense registros del perfilógrafo de 1.0 $\pm$ 0.2 m desde y paralelos a ambas orillas del pavimento y a ambos lados de cada junta longitudinal planeada o en cada trayectoria planeada de llantas.

7.2 Cualesquiera excepciones a estos requerimientos de muestreo (por ejemplo, a 7.62 m de cada puente) deben ser estipuladas.

8. Calibración.

8.1 Registro de altura:

8.1.1 Colóquense bloques de medición de 10 mm y 60 mm bajo la llanta sensora superficial. El registro debe indicar la altura real de cada plataforma dentro de 0.5 mm.

8.1.2 Verifique la estandarización del registro de altura antes de cada semana de uso, cuando el perfilógrafo sea reensamblado y cuando haya evidencia de posible imprecisión.

8.2 Distancia de Registro:

8.2.1 Marque una distancia de 30 m en un pavimento razonablemente uniforme. Mueva el perfilógrafo hacia adelante hasta que un punto particular esté en la primera marca y haga que la grabadora marque el evento en el registro. Mueva el perfilógrafo hacia adelante otra vez hasta que el punto esté en la segunda marca y haga que la grabadora lo registre también. El registro debe indicar 30 $\pm$ 0.3 m entre ambos eventos (10 $\pm$ 0.1 cm en el registro gráfico).

8.2.2 Verifique la estandarización de la distancia de registro antes de cada mes de uso y cuando haya evidencia de posible imprecisión.

9. Procedimiento.

9.1 Limpie la ruta del perfilógrafo de todo material suelto y de objetos extraños.

9.2 De ser posible, mueva el perfilógrafo alrededor de 10 m hacia adelante al punto de inicio. Una vez ahí, ponga el registro en inicio y haga las primeras anotaciones.

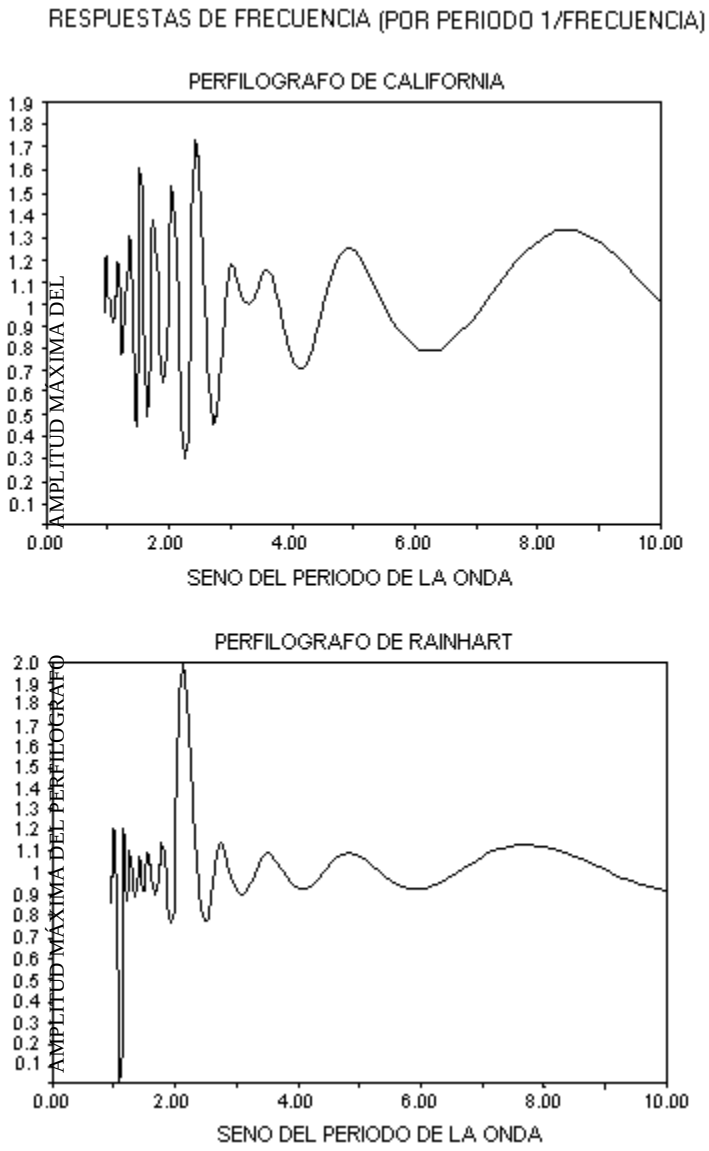
9.3 Mueva el perfilógrafo hacia adelante no más rápido que 5 km/h, guiándolo para que se mantenga en la trayectoria de muestreo prescrita. Pueden hacerse observaciones pertinentes acerca del sitio estudiado o de condiciones inusuales en el registro, únicamente conforme se vayan presentando. Observe la grabadora para detectar cualquier operación inusual.

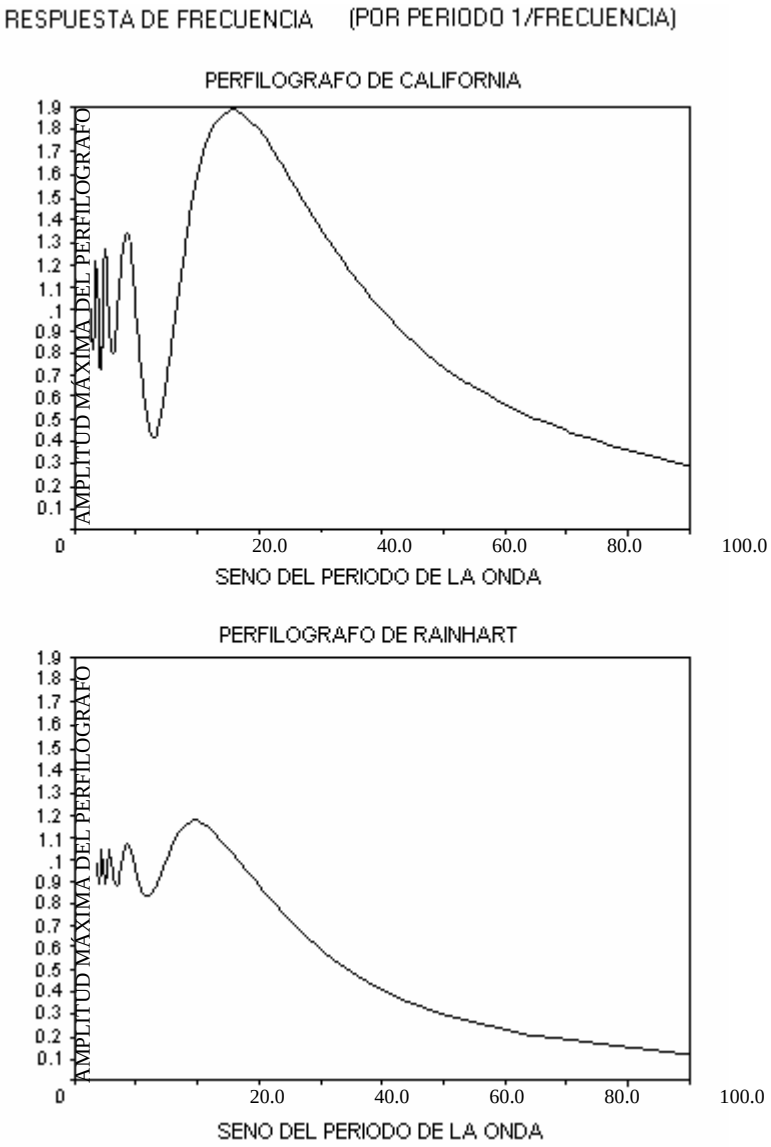
9.4 Una vez completada una ruta de muestreo, haga anotaciones finales y revise el registro para verificar que sea razonable. Repita el proceso para rutas sucesivas.

10. Cálculo

Nota 1. Los cálculos pueden efectuarse a mano con la banda en blanco y plantillas de altura excesiva, o electrónicamente con programas de computadora.

10.1 Aplique la banda en blanco a longitudes sucesivas del registro de la superficie. Determine la rugosidad a partir de cada protuberancia. Sume toda la rugosidad de cada segmento estipulado. Del registro de la superficie, determine la distancia longitudinal entre los puntos más lejanos de las protuberancias o no protuberancias iniciales y finales. Divida el resultado de la suma entre la distancia longitudinal correspondiente para calcular la tasa de rugosidad para ese segmento de esa ruta.





Nota 1.- Esta figura proviene de Walker, Roger S. Y H. T. Lin, Universidad de Texas en Arlington, Proyecto de Investigación 8-10-87-569, "Correlación de los Perfilógrafos de California y Rainhart con PSI", realizado el proyecto para el Departamento de Carreteras y Transporte Público del Estado de Texas en cooperación con el Departamento de Transporte de Estados Unidos, Administración Federal de Carreteras (FHWA)

Figura 3. Simulación de Computadora de Respuestas del perfilógrafo a Datos de Entrada Sinusoidales de Diferentes Períodos (Longitudes de Onda)

10.2 Aplique la cuerda de altura excesiva a la parte superior de cada onda del registro de la superficie. Identifique todos los topes que son excesivamente altos y su posición.

11. Informe.

11.1 Para cada aplicación específica deberá proporcionarse la siguiente información:

11.1.1 La altura de la banda en blanco con aproximación de 1 mm.

11.1.2 Corte de altura con aproximación de 1 mm

11.1.3 Perfilógrafo con o sin llantas de plataforma de referencia uniformemente espaciadas.

11.1.4 La longitud de cada segmento para el cual se calcula la tasa de rugosidad.

12. Precisión y Sesgo.

12.1 La precisión y el sesgo de este método de prueba están siendo determinados.

13. Palabras Clave

13.1 Registro gráfico de la superficie; pavimento; rugosidad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Huft, D.L., *South Dakota Profilometer.* Transportation Research Record 1000, (1984).
[2] Perera, R.W., et al., *Comparative Testing of Profilometers*. Transportation Research Record 1435, (1994).
[3] Sayers, M.W., et al., *The International Road Roughness Experiment*. World Bank Technical Paper Number 45, (1986).
[4] Sayers, M.W., et al., *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. World Bank Technical Paper Number 46, (1986).
[5] *Highway Performance Monitoring System, Field Manual*, Appendix J. U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. FHWA Publication 5600.1A, (1990).
[6] Janoff, M.S., et al., *Pavement Roughness and Rideability*. National Cooperative Highway Research Program Report 275, (1985).
[7] Ervin, R. D., et al, *Influence of Truck Size and Weight Variables on the Stability and Control Properties of Heavy Trucks*. Federal Highway Administration Report FHWA-RD-83-030, (1983).
[8] Sweatman, P.F., *Effect of Heavy Vehicle Suspensions on Dynamic Road Loading*. Australian Road Research Board ARR 116, (1980).
[9] Sweatman, P.F., *A Study of Dynamic Wheel Forces in Axle Group Suspensions of Heavy Vehicles*. Australian Road Research Board SR27, (1983).
[10] Gillespie, T.D., et al., *Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*. National Cooperative Highway Research Program Report 353, (1993).
[11] *The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research*. Highway Research Board Special Report 61E, (1962).
[12] Carey, W.N. and P.E. Irick, *The Pavement Serviceability-Performance Concept*. Highway Research Board Bulletin 250, (1960) pp. 40-58.
[13] Novak, E.C. and L.E. DeFrain Jr., *Seasonal Changes in the Longitudinal Profile of Pavements Subject to Frost Action*. Transportation Research Record 1362, (1992).
[14] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Normativa SCT para Carreteras. México. (2004).
[15] American Society of Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.03, Road and Paving Materials*, Philadelphia (1999).
[16] Ma. S. and Caprez, M. *The Pavement Roughness Requirement for WIM*. First European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. Switzerland (1995).
[17] Smith, K.L., Smith, K.D. Evans, L.D., Hoerner, T.E. Darter, M.I. and Woodstrom, J.H. *Smoothness Specifications for Pavements*. National Cooperative Highway research Program, Transportation Research Board, Washington, DC, (1997).
[18] Sime, M., Ashmore, S.C. and Alavi, S., *Westrack Track Roughness. Fuel Consumption and Maintenance Cost*. Federal Highway Administration. FHWA-RD-00-052. (2000).
[19] Janoff, M.S., *Pavement Roughness and Rideability Field Evaluation.* National Cooperative Highway Research Program Report 308, (1988).
[20] Sayers, M. W. and Karamihas, S. M, *Interpretation of Road Roughness Profile Data*. Federal Highway Administration, FHWA/RD-96/101 (1996).
[21] Sayers M. and Karamihas S. *The Little Book Of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute. (1997).
[22] Karamihas, S.M., Gillespie, T.D., Perera, R.W. and Kohn, S.D., *Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement*. NCHRP Report 434, Transportation Research Board, Washington, DC, (1999).
[23] Gillespie, T.D., Sayers, M.W. and Segel, L., *Calibration of Response-Type Road Roughness Measurement Systems*, NCHRP Report 228, (1980).
[24] *Methodology for Road Roughness Profiling and Rut Depth Measurement*, Contract No.DTFH61-83-C-00123, Federal Highway Administration, The University of Michigan, July 1983.
[25] Devore, J.J. and Hossain, M., *An Automated System for Determination of Pavement Profile Index and Location of Bumps for Grinding from the Profilograph Traces*, Kansas State University, Report K-TRAN: KSU-93-2, Kansas. (1994).
[26] Scofield, L., *Profilograph Limitations, Correlations and Calibration Criteria for Effective Performance Based Specifications*. NCHRP Project 20-57, Task 53 (1992).

[27] Spangler, E. B. and Kelley, W. J., *GMR Road Profilometer. A Method for Measuring Road Profile*. Research Publication GMR-452, General Motor Research Laboratory, Warren Michigan (1964).
[28] Haas, R. and Hudson, W.R., *Pavement Management Systems*, Robert E. Krieger Publishing Company, Florida.
[29] Woodstrom, J.H., *Measurements, Specifications, and Achievement of Smoothness for Pavement Construction*. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 167, Transportation Research Board (1990).
[30] Kulakowski, B.T. and J.C. Wambold, *Development of Procedures for the Calibration of Profilographs*. Pennsylvania Transportation Institute, *Report FHWA-RD-89-110*, (1989).
[31] Darlington, J.R., *The Lightweight Pavement Profile Instrument*. Michigan Department of Transportation, Research Report R-1318, Lansing, Michigan (1992).
[32] Federal Highway Administration. *Pavement Smoothness Index Relationships*: Final report. 2002. Estados Unidos.
[33] ASTM. Standard Método de Prueba Normalizado para Medir la Rugosidad del Pavimento Utilizando un Perfilógrafo. E 1274–88 (Reaprobado en 1993). 2004. Estados Unidos
[34] Dirección General de Servicios Técnicos. *Informe de Resultados de la Determinación del Índice de Perfil Longitudinal en Diversos Tramos Carreteros*. 2005. México.
[35] California Department of Transportation. *Operation of California Profilograph and Evaluation of Profiles*. 2000. Estados Unidos.
[36] Florida Department of Transportation. *Florida Method of Test for Cox's California Profilograph (Model C8200 Electronic)*. 2000. Estados Unidos.
[37] Iowa Department of Transportation. *Method of Test Determining Pavement Profiles with The 7.6 meter (25 foot) Profilograph*. 2000. Estados Unidos.
[38] Duran, G. *Modelo VOCMEX, Traducción de Vehicle Operating Costs Model, versión 3.0*, Instituto Mexicano del Transporte. México. 1994.
[39] ASTME1148-92 (Reaprobada en 1998). *Practica Estándar para la Calibración de Sistemas Usados para Medir la Respuesta Vehicular a la Rugosidad de Pavimentos*. Estados Unidos. 1998.
[40] ASTM E 1364-95 (Reaprobada en 2000). *Método de Prueba Estándar para medir la Rugosidad de Caminos por el Método de Nivel Estático*. Estados Unidos. 2000.
[41] ASTM E 1364. *Método de Prueba Estándar para medir la rugosidad de caminos por el Método de Nivel Estático*. Estados Unidos. 1995.
[42] ASTM E 1274-03, Método de Prueba Estándar para Medir la Rugosidad del Pavimento, utilizando un Perfilógrafo. Estados Unidos. 2003.
[43] Garnica P. Índice de Rugosidad Internacional en la Red carretera de México. Instituto Mexicano del Transporte. México. 1998.
[44] Arroyo Osorno, J.A. Aguerrebere Salido, R. *Estado superficial y costos de operación en carreteras*, Instituto Mexicano del Transporte. México. 2002.
[45] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Libro de Datos Viales 2005*. Subsecretaría de Infraestructura. México. 2005.