

ISSN 0188-7297

**LA RESPUESTA DINAMICA DE UN
CUARTO
DE CARRO Y EL INDICE
INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD**

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Publicación Técnica No. 67
Sanfandila, Qro. 1995

ISSN 0188-7297

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

**La respuesta dinámica de un cuarto de carro
y el índice internacional de rugosidad**

Publicación Técnica No 67
Sanfandila, Qro. 1995

Este trabajo fue elaborado en el Instituto Mexicano del Transporte por José Antonio Romero Navarrete y Alejandro Lozano Guzmán.

Contenido

	página
Resumen	
1. Introducción	1
2. Definiciones y conceptos físicos	3
3. Equipos para la determinación del IIR	
3.1 Evaluación del IIR por medio de Sistemas de Medición de la Rugosidad por Respuesta Dinámica (SMRRD)	7
3.2 Evaluación del IIR empleando perfilómetros	7
3.3 Metodología de obtención del IIR dependiendo del tipo de equipo	8
4. Modelado de la respuesta dinámica de un cuarto de carro	11
5. Resultados de la simulación de un cuarto de carro y el IIR	15
6. Conclusiones	17
Referencias	19

Resumen

En este trabajo se presentan los antecedentes que condujeron a tomar el modelo de un cuarto de carro para la definición del Índice Internacional de Rugosidad. Asimismo, se da la metodología general para su establecimiento, sus bases matemáticas y se presentan ejemplos para distintos caminos.

1. Introducción

El impacto económico del estado superficial de los pavimentos sobre la economía del transporte ha sido reconocido a todos los niveles de las estructuras sociales y productivas de las naciones [1]. Por esta razón, instituciones financieras internacionales, tales como el Banco Mundial, han apoyado proyectos para el establecimiento de políticas efectivas de conservación de la infraestructura carretera [2]. En este contexto, surge la necesidad de contar con un indicador objetivo y normalizado del estado de los pavimentos. Así se tiene que el verificar en forma normalizada y continua la rugosidad de los pavimentos, permite evaluar las políticas y técnicas de construcción y conservación empleadas. Esta verificación también proporciona información sobre el impacto que los factores de uso y ambientales tienen sobre el estado de los pavimentos. Finalmente, esta verificación en forma continua es de suma importancia, ya que se ha establecido que el retraso en el mejoramiento del estado superficial del pavimento, por falta de una verificación eficiente, ocasiona un incremento importante en los recursos necesarios para su corrección [3]. Esto último obedece a que el deterioro se acelera de acuerdo al incremento en la magnitud de las cargas dinámicas [4]. Así, se establece que la rugosidad es un parámetro de los pavimentos que influye en la seguridad y economía del transporte, incidiendo en el confort y fatiga de los usuarios así como en el deterioro de los vehículos y productos transportados. A lo largo de las cuatro últimas décadas se dieron esfuerzos con objeto de establecer un patrón universal de la medida de la rugosidad de los caminos. Como resultado de este proceso, en 1984 quedó definido el Índice Internacional de Rugosidad (IIR). La definición de este índice está basada en la respuesta dinámica de un modelo matemático conocido como "cuarto de carro" (CC), al perfil de un camino. Este CC es un sistema de dos grados de libertad, que modela un monociclo, con parámetros definidos e invariables. De esta manera, el IIR es el promedio de la diferencia de la relación desplazamiento vertical entre recorrido horizontal, de las dos masas involucradas, al recorrer el perfil medido del camino. Esto para una velocidad y una longitud de referencia.

La preocupación por establecer una medida universal para la rugosidad de los pavimentos es reportada en 1941 por Buchanan y Catudal [5]. El concepto de eficiencia en el servicio es introducido por Carey e Irick en 1960 [6]. La caracterización estadística del pavimento es abordada por diversos autores. De esta manera, Macaulay en 1963 [7], Wenderborn en 1967 [8], Parkhilovskiy en 1968 [9] y La Barre en 1969 [10], analizan las densidades espectrales del perfil del pavimento de diferentes caminos. La aplicación de este enfoque estadístico, a los pavimentos de los aeropuertos, es reportada por Thompson en 1958 [11]. Los equipos y métodos especializados para

establecer una medida de la rugosidad son reportados desde la década de los sesentas; Sprangler et al, en 1964 [12] y en 1966 [13]. En esa década se reportan distintos equipos de respuesta dinámica [14,15,16,17] y se desarrollan diferentes modelos matemáticos para analizar el comportamiento de los vehículos ante la rugosidad del camino, entre ellos, aquél de dos grados de libertad [18,19], asimismo se define el índice de impacto, asociado a la rugosidad del camino [20]. Como producto de todos los estudios y equipos, en la década de los ochentas, en una institución especializada en la seguridad en el transporte de la Universidad de Michigan, surge en forma sistematizada la atención al problema de definición de una medida o método universal para determinar el nivel de rugosidad de los pavimentos. De esta manera, Gillespie en 1981 plantea, a petición del Banco Mundial, un esquema técnico para la normalización mundial de la medición de la rugosidad [21]. Este planteamiento culmina con la realización de un experimento internacional (Brasil, 1982) para establecer y validar la correlación y calibración de los diferentes equipos y métodos para la medición de la rugosidad [22]. Como resultado de esos trabajos se definió el IIR.

Respecto a los equipos empleados para la medición de la rugosidad, éstos han evolucionado de ser electromecánicos a opto-electrónicos, siendo capaces de medir estos últimos el perfil tanto longitudinal como transversal de los pavimentos. Una de las reuniones recientes llevadas a cabo para el análisis y validación de los equipos opto-electrónicos, se dió en 1990, bajo el proyecto "Strategic Highway Research Program" de los Estados Unidos. Bajo ese mismo proyecto, al cual se han incorporado varios países europeos, han sido producidos paquetes de cómputo, así como recomendaciones e instrucciones para llevar a cabo la determinación del IIR [23-27]. A diferencia de los equipos iniciales, los cuales permitieron obtener la medición correspondiente a una o dos trayectorias de rodado, los equipos optoelectrónicos permiten obtener la conformación de la superficie del camino.

2. Definiciones y conceptos físicos

Los conceptos en los que se basa el IIR son :

Perfil del camino y discretización

Perfil del camino se entenderá como la curva resultante de efectuar un corte longitudinal para una cota transversal dada, del tramo carretero bajo estudio. Los equipos más modernos permiten describir tridimensionalmente la superficie del pavimento. Sin embargo, se sigue considerando el perfil del camino para una posición transversal dada, como una medida del estado general de la superficie de rodamiento.

Se entenderá como discretización del perfil del camino, la división del segmento carretero, en tramos rectos de igual longitud. La longitud de los tramos dependerá de la resolución deseada del perfil del camino. Esto es, una superficie de rodamiento en buen estado permitirá tomar una longitud mayor que la requerida para definir una carretera en mal estado.

Un cuarto de carro (CC)

En la figura 1 se presenta el esquema de un monociclo teórico, el cual tiene parámetros constantes y predeterminados para sus características dinámicas. Este monociclo consta de dos masas, una asociada a la suspensión y la otra al vehículo. La suspensión consta de un resorte y un amortiguador, mientras que a la llanta se le asocia únicamente un resorte.

Movimiento de un cuarto de carro

Se entenderá como movimiento de un cuarto de carro a la vibración de las masas del CC, al circular por el perfil de un camino a una determinada velocidad. Este movimiento tiene como excitación el perfil del camino.

Pendiente rectificadora promedio

En la figura 2 se presenta, para el esquema discretizado mostrado en esta figura, dos posiciones consecutivas de una de las masas del CC. Así, la pendiente rectificadora (PR) queda definida como la relación del desplazamiento vertical entre el recorrido horizontal, lo cual, para el caso mostrado, está representado por b/a . A su vez, también se define

2. Definiciones y conceptos físicos

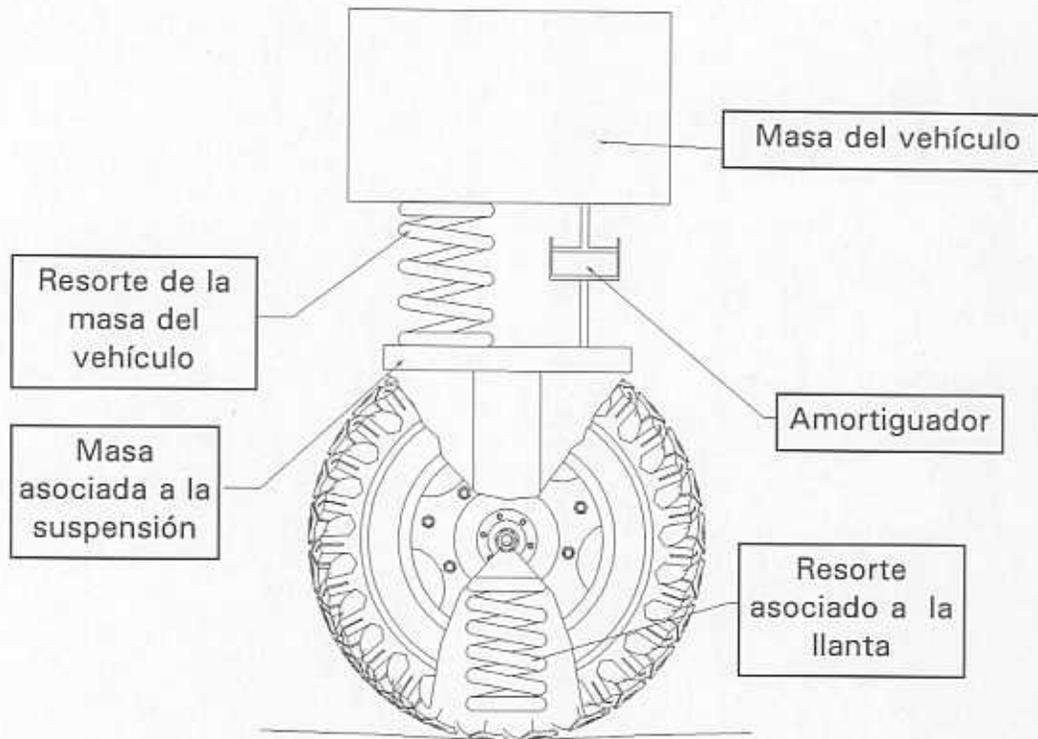


Figura 1. Representación gráfica del modelo matemático de "un cuarto de carro"

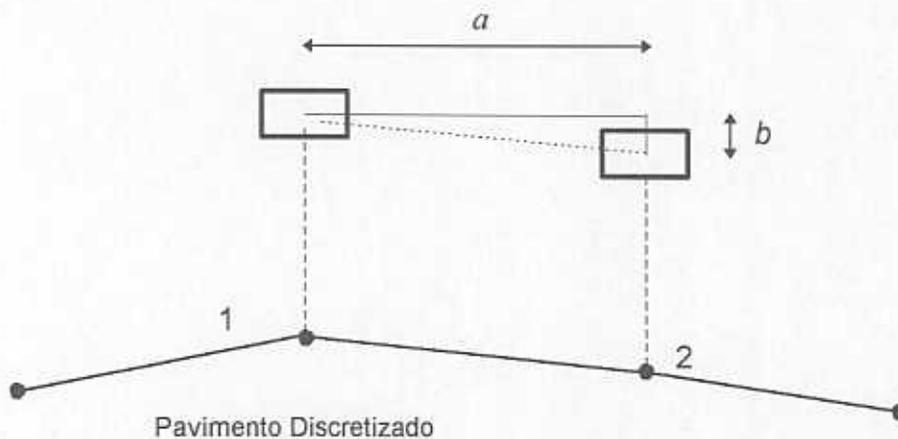


Figura 2. Relación del desplazamiento vertical y recorrido horizontal de la masa del cuarto de carro entre dos puntos consecutivos

la pendiente rectificadora promedio (PRP) para un tramo carretero, como el promedio de las PRs para ese tramo.

Pendiente rectificadora de referencia

Esta característica de la respuesta dinámica de un vehículo, es la pendiente rectificadora promedio para la velocidad de referencia. Atendiendo a las características de vehículos y pavimentos, se estableció que esta velocidad de referencia fuera de 80 km/h.

Índice Internacional de Rugosidad (IIR)

Es la pendiente rectificadora promedio de referencia, de la respuesta dinámica teórica del movimiento relativo de las masas del CC, circulando a 80 km/h. Para el cálculo del IIR, se establecieron los siguientes parámetros :

Relación de la constante del resorte de la suspensión a la masa suspendida: $63.3 / s^2$

Relación de la constante del resorte de la llanta a la masa suspendida : $653 / s^2$

Relación de la constante de amortiguamiento de la suspensión a la masa suspendida : $6 / s$

Relación de la masa de la suspensión a la masa del vehículo : 0.15

El desplazamiento considerado en el cálculo del IIR es el relativo entre las dos masas del CC. En la figura 3 se muestra la pendiente rectificadora promedio para la masa del vehículo, la de la suspensión y la del movimiento relativo, que es la que se define como el IIR.

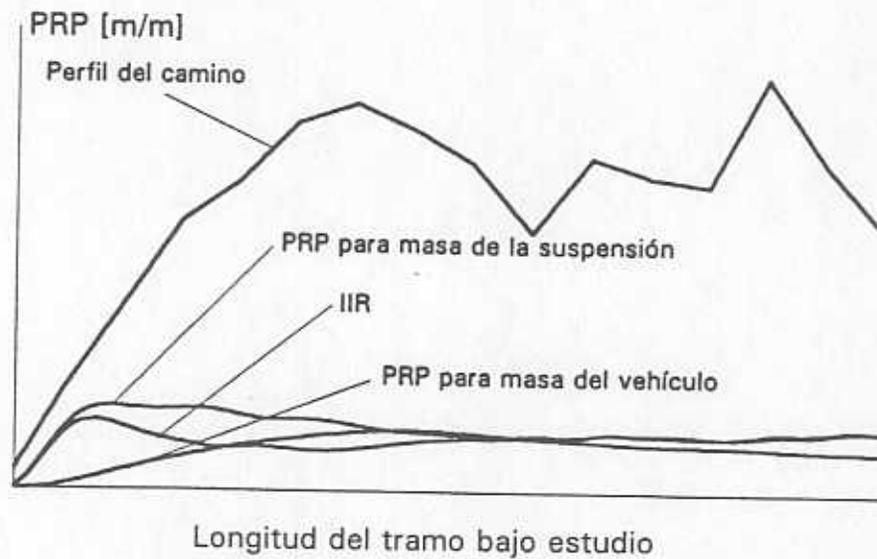


Figura 3. Pendiente Rectificada Promedio para el desplazamiento de la masa del vehículo, de la masa de la suspensión, y el relativo entre ambas masas.

3. Equipos para la determinación del IIR

De acuerdo al equipo empleado para la evaluación del IIR se pueden establecer básicamente dos metodologías para su evaluación. Por un lado, los equipos de la medición de la respuesta dinámica y por el otro los perfilómetros.

3.1 Evaluación del IIR por medio de sistemas de medición de la rugosidad por respuesta dinámica (SMRRD).

El principio de operación de estos sistemas, es la detección de la vibración de un equipo lo más parecido posible al CC Teórico, al circular en el camino bajo estudio. En este caso, no se ha logrado reproducir exactamente el funcionamiento del CC teórico, debido a variaciones en la temperatura ambiente, en la presión de inflado de la llanta, así como en el coeficiente de amortiguamiento por variaciones de la temperatura y la profundidad de dibujo de la llanta. Debido a estas variaciones, el empleo de estos sistemas requiere una calibración respecto a la respuesta teórica del CC, para tener una correspondencia entre la medición de campo y el valor reportado por el modelo, para el mismo perfil registrado en campo.

3.2 Evaluación del IIR empleando perfilómetros.

A diferencia del SMRRD que obtiene la vibración relativa entre dos masas, los perfilómetros permiten obtener el perfil real del camino. Es decir, se obtiene el contorno de la carretera lo que permite dar este dato como entrada al modelo de un cuarto de carro y obtener directamente el IIR.

Los perfilómetros a su vez, se pueden agrupar en perfilómetros estáticos y dinámicos.

En los primeros, el perfil del camino a ser alimentado al modelo de un cuarto de carro puede obtenerse por medios cuasi-estáticos, mediante el uso de barras y niveles. El nivel de exactitud de estas mediciones es el mayor que puede ser obtenido, con la enorme desventaja de ser poco práctico considerando la longitud de las carreteras a evaluar, por lo que su aplicación se ve limitada a pavimentos de aeropuertos o para crear tramos de calibración al aplicar SMRRD.

3. Equipos para la determinación del IIR

Por lo que respecta a los perfilómetros dinámicos, éstos permiten obtener el perfil del camino, circulando por el tramo de interés a una velocidad cercana a la de proyecto de la carretera. Al contrario de los SMRRD, los perfilómetros dinámicos tienen la ventaja de que su exactitud y precisión no dependen de las condiciones ambientales, al tiempo que no requieren calibraciones frecuentes, dado que su comportamiento dinámico implica una ganancia relativa igual a la unidad. Esto último debido a que el movimiento de la masa sensora sólo responde al desplazamiento provocado por las imperfecciones del camino.

Los sistemas de medición de la rugosidad por respuesta dinámica son los más empleados en la actualidad, dado su relativo bajo costo respecto al de los perfilómetros. Sin embargo y como ya fue mencionado, al depender de las condiciones ambientales, estos equipos requieren de calibraciones periódicas y de tramos de calibración cercanos a los segmentos carreteros a estudiar. Estos tramos de calibración permiten la obtención de factores de correlación entre la respuesta dinámica teórica del cuarto de carro y la respuesta dinámica del SMRRD empleado. De esta manera es posible efectuar la correspondencia entre estos dos diferentes resultados y establecer un IIR, a partir de las mediciones de las pendientes rectificadas registradas por el SMRRD.

3.3 Metodología de obtención del IIR dependiendo del tipo de equipo.

Si se emplea un sistema que detecte la respuesta dinámica, se requiere lo siguiente :

A. Definir un plano longitudinal en el tramo de carretera seleccionado para fines de calibración. La longitud de este tramo no deberá ser menor de 60 metros, para que el equipo de medición no se vea afectado por variaciones locales (por ejemplo, baches y cruces de ferrocarril) y alteraciones de baja de frecuencia (por ejemplo, "columpios"). Este tramo de calibración se recomienda sea lo más parecido posible al tramo a estudiar para minimizar errores de medición.

B. Efectuar el levantamiento topográfico del perfil del tramo de referencia, mediante el empleo de un perfilómetro estático. Dependiendo de la rugosidad, la discretización del perfil será corto (aproximadamente 10 cm) para pavimentos en mal estado y largos (aproximadamente 50 cm) para carreteras en buen estado.

C. Verificar los parámetros de operación del equipo a emplear y registrar la temperatura ambiente, pues esto afecta las presiones de inflado.

Dependiendo de la recomendación del manual del equipo específico que se esté empleando, hacer dos o tres recorridos de calentamiento para que los parámetros se estabilicen.

D. Aunque no está establecido como una norma, se recomienda efectuar el recorrido de medición al menos dos veces y promediar los resultados para minimizar errores de operación del equipo.

Después de estos pasos, ya se puede obtener un índice de rugosidad asociado al instrumento y al plano longitudinal seleccionado, así como el perfil del camino del tramo de referencia. Previamente a los siguientes pasos, debe contarse con el modelo de un cuarto de carro, corriendo en una computadora, así como el archivo de datos para excitar el modelo matemático del CC¹.

E. Alimentar el perfil del camino al modelo de un cuarto de carro, para obtener el Índice Internacional de Rugosidad para el tramo de referencia y compararlo con el índice de rugosidad obtenido de las mediciones en campo. Con los datos anteriores, obtener el factor de correlación entre el equipo disponible y el IIR.

Como información adicional, se recomienda graficar el IIR del modelo matemático, y compararlo con el índice de rugosidad de las mediciones del campo a intervalos discretos, para verificar que no hay alteraciones importantes que afecten el valor final del factor de correlación.

F. Llevar a cabo las mediciones en campo que se requieran con el equipo disponible, aplicando el factor de correlación obtenido, cuidando que las condiciones de las mediciones sean similares a aquellas establecidas para el tramo de calibración.

Se recomienda efectuar calibraciones periódicas, especialmente si los tramos a caracterizar son muy diferentes al tramo de referencia seleccionado.

Si se emplea un equipo que obtenga el perfil del camino (perfilómetro dinámico), se requiere seguir las siguientes acciones:

¹ El listado del programa de computadora para la respuesta dinámica de un cuarto de carro esta disponible en lenguaje BASIC en la referencia 22. En lenguaje C, en diskette, en :

3. Equipos para la determinación del IIR

a. Seguir el procedimiento de calibración del perfilómetro recomendado por el fabricante. Para este tipo de equipos, generalmente este procedimiento no depende de ninguna medición externa, pues la calibración es respecto a referencias del propio equipo.

b. A las velocidades recomendadas de operación, recorrer los tramos cuyo IIR se requiere obtener, teniendo cuidado de ordenar adecuadamente las bases de datos. Esto se puede lograr listando en dos columnas la distancia recorrida y el valor del perfil.

c. Alimentar la base de datos al programa de computadora, que analiza la dinámica del CC, para obtener el IIR del tramo bajo estudio.

Para disponibilidad de este programa, ver nota en página 10.

En la figura 4 se muestra un diagrama de flujo para la determinación del IIR, de acuerdo al tipo de instrumentos empleados.

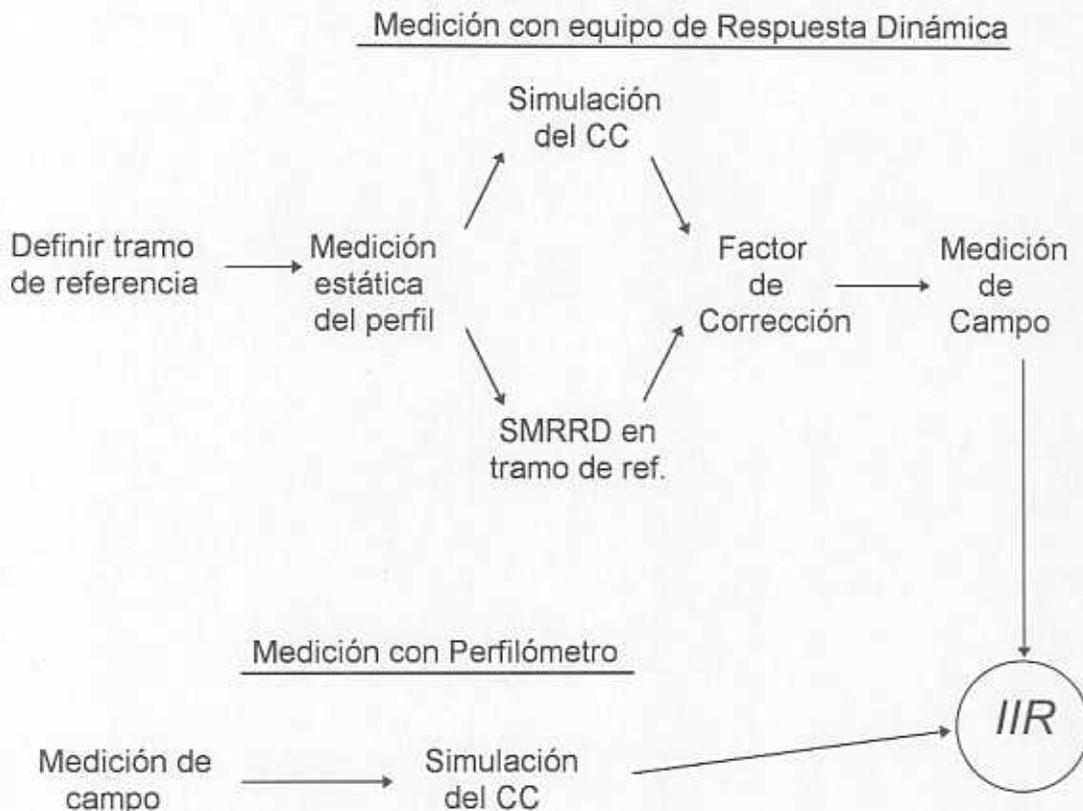


Figura 4. Procedimiento para establecer el IIR

4. Modelado de la respuesta dinámica de un cuarto de carro

De acuerdo a los diagramas de cuerpo libre mostrados en la figura 5, las ecuaciones de movimiento para el sistema mostrado en la figura 1 son :

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \\ m_u \ddot{z}_u &= -k_1(z_u - Y(t)) + k_2(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \end{aligned}$$

donde :

c_s es la constante de amortiguamiento viscoso [Ns/m]

k_s es la constante de rigidez de la suspensión [N / m]

m_u es la masa de la suspensión [kg]

c_s es la constante de rigidez de la suspensión [N / m]

k es la constante de rigidez de la llanta [N / m]

z_s es el desplazamiento de la masa del vehículo [m]

z_u es el desplazamiento de la masa de la suspensión [m]

$Y(t)$ es la altura del perfil del camino [m]

Aplicando las siguientes igualdades :

$$\frac{k_s}{m_s} = K_2, \quad \frac{c_s}{m_s} = C, \quad \frac{k_1}{m_s} = K_1, \quad \frac{m_u}{m_s} = u$$

derivando y reagrupando términos, las ecuaciones de movimiento se convierten en :

$$\begin{Bmatrix} \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_u \\ \ddot{z}_u \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{C}{u} & -\frac{(K_1 + K_2)}{u} & -\frac{C}{u} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_1}{u} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Y(t) \end{Bmatrix}$$

que es una ecuación matricial de la forma,

$$\{\dot{y}(t)\} = [A]\{y(t)\} + [B]\{Y(t)\}$$

donde

$$\{\dot{y}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_s \\ \dot{z}_u \\ \dot{z}_u \end{Bmatrix}, \quad \{y(t)\} = \begin{Bmatrix} z_s \\ z_s \\ z_u \\ z_u \end{Bmatrix}, \quad [A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{C}{u} & -\frac{(K_1+K_2)}{u} & -\frac{C}{u} \end{bmatrix},$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_1}{u} \end{bmatrix}$$

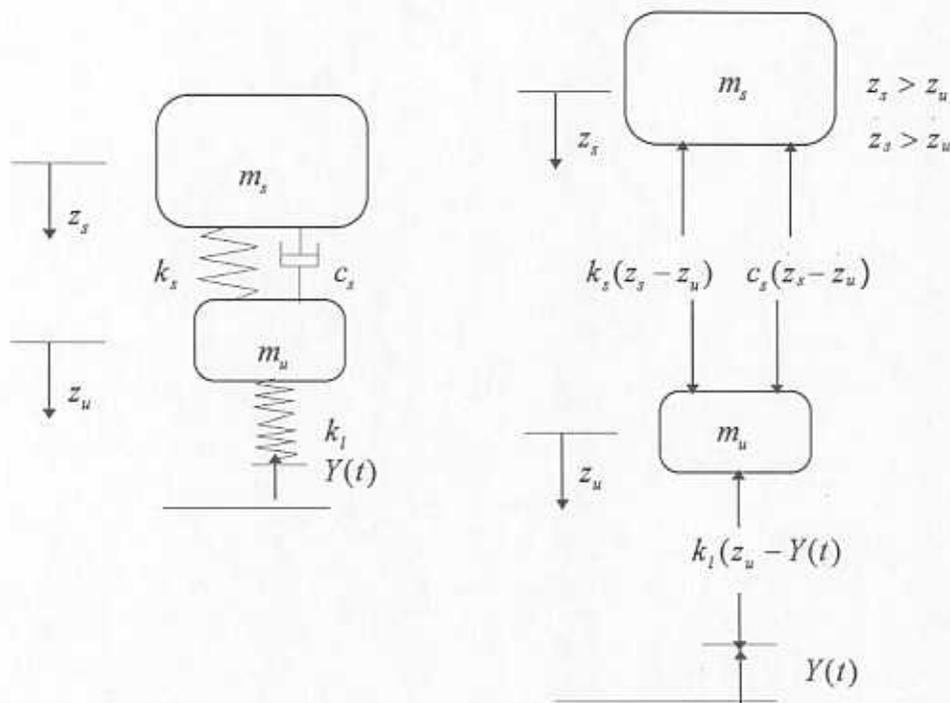


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre del "cuarto de carro" mostrado en la figura 1.

5. Resultados de la simulación de un cuarto de carro y el IIR

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del CC para dos tipos de pavimentos. La entrada al modelo matemático es el perfil del camino. Se hacen notar los distintos comportamientos del CC y su relación con el IIR. En los ejemplos que se presentan, se discretizó el perfil del camino cada 100 milímetros, y en las gráficas se muestran los siguientes datos :

- Movimiento de la masa del vehículo.
- Movimiento de la masa de la suspensión.
- Perfil del camino.
- IIR.

De esta manera, en la figura 6 se puede observar lo siguiente :

- En este caso el pavimento no tiene grandes variaciones de nivel.
- La masa de la suspensión presenta variaciones similares a las del perfil del camino.
- La masa del vehículo sufre desplazamientos de distinto orden de magnitud respecto a las variaciones del perfil del camino. Esto se da por la interacción que se presenta con la suspensión.
- Como es de esperarse, el IIR sufre variaciones importantes para variaciones importantes en el perfil del camino.

En la figura 7, se puede observar lo siguiente :

- Se incorporaron variaciones importantes en el perfil del pavimento.
- El perfil del camino graficado, corresponde a un pavimento en malas condiciones, con variaciones de hasta 35 mm en una longitud de 2 metros.
- A pesar de las grandes variaciones en los desplazamientos de la masa de la suspensión, el IIR es una curva sin perturbaciones importantes, dando con ello una medida confiable de la rugosidad del camino.

5. Resultados de la simulación de un cuarto de carro y el IIR

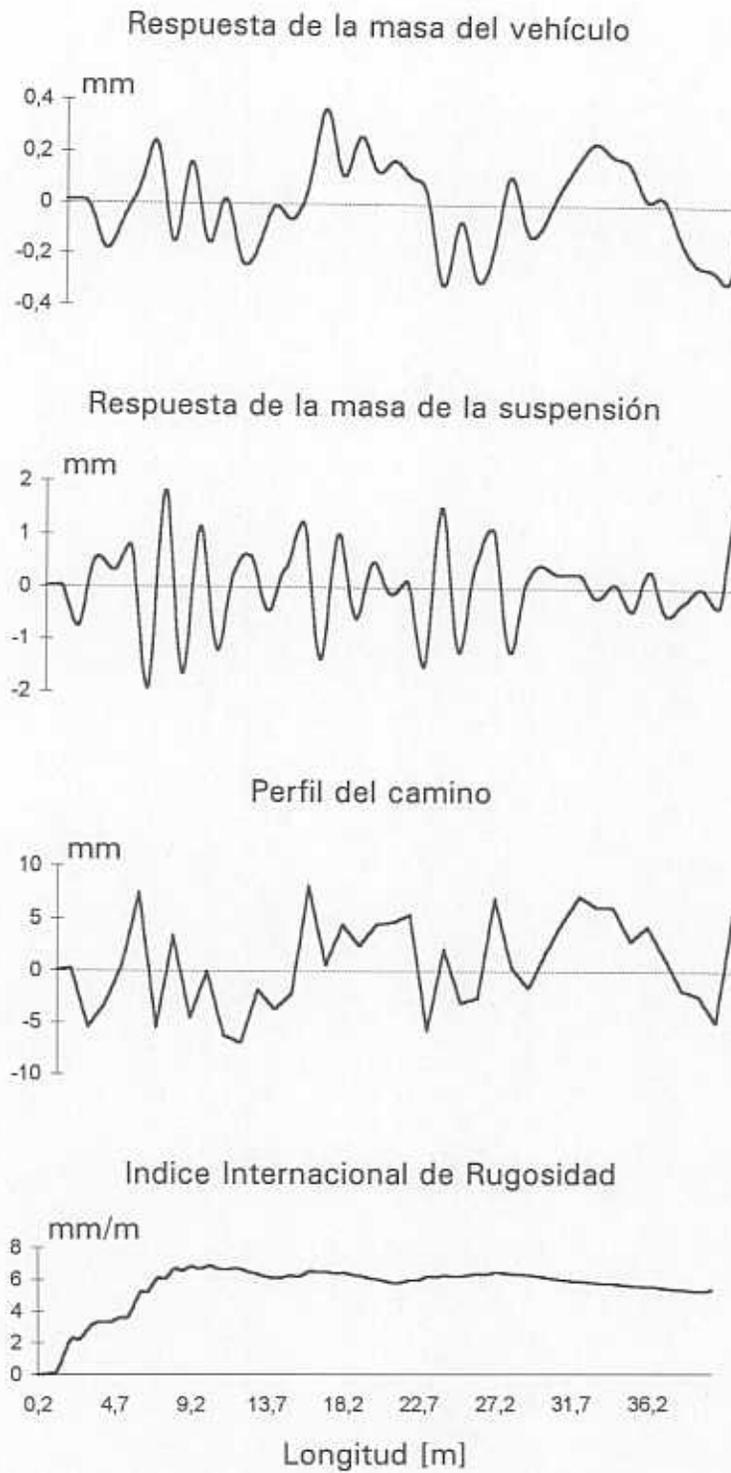


Figura 6. Ejemplo de los valores relativos de desplazamientos. Camino en buen estado.

5. Resultados de la simulación de un cuarto de carro y el IIR

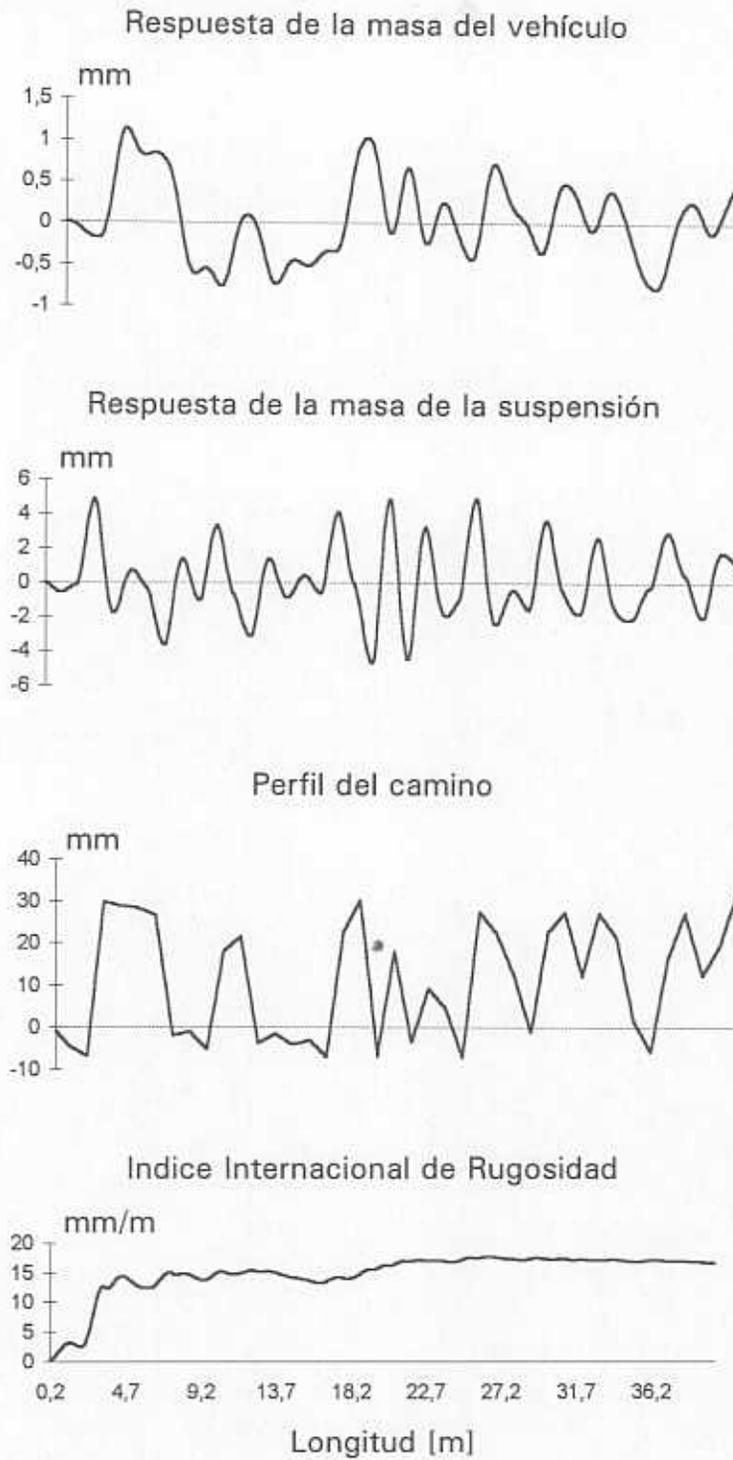


Figura 7. Ejemplo de los valores relativos de desplazamientos. Camino en mal estado.

6. Conclusiones

El Índice Internacional de Rugosidad (IIR) es un parámetro de los pavimentos, que permite establecer una medida confiable y objetiva del estado de los mismos. Inclusive, esta medida puede llegar a dar información de los defectos estructurales al ver sus efectos característicos en la superficie de rodamiento. Aunque el establecimiento de este índice fue promovido por el Banco Mundial en su afán de contar con una medida del estado de la infraestructura carretera en diversos países, esta medida propició la comunicación global, tanto nacional como internacional, de los resultados de la aplicación de tecnologías y políticas empleadas para la conservación y construcción de los pavimentos así como de los efectos sobre éstos, de las condiciones de uso y ambientales.

En este trabajo se identifican dos metodologías para la determinación del IIR, las cuales dependen del equipo empleado. Este puede consistir de instrumentos para la medición del perfil del camino, o de instrumentos que responden dinámicamente a él. De acuerdo con lo anterior, los primeros permiten obtener la información del IIR directamente, mientras que los segundos requieren de establecer las correlaciones correspondientes.

El método más directo y confiable para la obtención del IIR es el que emplea perfilómetros. Sin embargo, el costo de adquisición de estos equipos, sigue haciendo muy popular el uso de instrumentos de respuesta dinámica, a pesar de requerir éstos mayor cuidado en su operación y procedimiento de calibración.



Referencias

1. Banco Mundial, 1988 "El deterioro de los caminos en los países en desarrollo. Causas y soluciones". Estudio de políticas del Banco Mundial. Washington. 40 pp.
2. Charles, R., 1994 "Programas de capacitación de educación continua y de investigación". Conferencia presentada en el panel Capacitación e intercambio tecnológico, del Seminario ProVial 1994. México.
3. Aguerrebere, R., et al, 1991, "Estado superficial y costo de operación en carreteras". Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación técnica no. 30. México. 69p.
4. Sweatman, P.F., 1983 "A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles." Reporte especial no. 27, Australian Road Research Board.
5. Buchanan, J.A. y Catudal, A.L., 1941 "Standardizable equipment for evaluating road surface roughness" Public Roads, Feb 1941.
6. Carey, W.N., Jr. y Irick, P.E., 1960 "The pavement serviceability-performance concept". HRB bulletin 250. Pp 40-58.
7. Macaulay, M.A., 1963 "Measurement of road surfaces". Advances in automobile engineering . Cranfield International Symposium, serie 4. Pp 93-112.
8. Wendeborn, J.O., 1967 "Description of road profile by means of the spectral density of the irregularities". ATZ Vol 69(5).
9. Parkhilovskiy, I.G., 1968 "Investigations of the probability characteristics of the surfaces of distributed types of roads". Avtom. Prom., Vol 8. Pp 18-22.
10. LaBarre, R.P., et al., 1969 "The Measurement and analysis of road surface roughness. Reporte 1970/5, The Motor Industrie Research Association. 31 p.
11. Thompson, W.E. 1958. "Measurements and power spectra of runway roughness at airport in countries and the North Atlantic treaty organization". NACA TN 4304.
12. Spangler, E.B., et al., 1964 "GMR Profilometer method for measuring road profile." General Motors Research Publication GMR-452, 44p.
13. Spangler, E.B. y Kelly, W.J., 1966 "GMR road profilometer- A method for measuring road profile". Highway research record 121. Washington.
14. Mays Ride Meter Booklet. 3ra ed. Rainhart Co. Austin. 1973.
15. Darlington, J.R., 1970 "Evaluation and application study of the General Motors Corporation rapid travel profilometer". Research report R-731. Michigan Dept of State Hwys.
16. Lucas, J. y Viano, A., 1979 "Systematic measurement of evenness on the road network: high output longitudinal profile analyser". French Bridge and Pavement Laboratories. Rep. 101. Francia.

Referencias

17. Whittemore, A.P. , 1974 'A technique for measuring effective road profile". SAE paper 720094.
18. Dahlberg, T., 1978 'Ride comfort and Road Holding of a 2-DOF vehicle travelling on a randomly profiled road". Journal of Sound and Vibration. Vol 58. No. 2. pp 179-187.
19. Burchett, J.L., et al, 1977 'Surface dynamics profilometer and quarter-car simulator: Description, evaluation and adaptation". Research report 465. Kentucky Dept. of Transportation.
20. Grier, J.H., 1975 'Highway Shock Index (SI) .Procedure for determining SI" Shock Vib Bull, Vol 45(4), U.S. Naval Res. Lab.
21. Gillespie, T.D., 1981 'Technical considerations in the worldwide standarization of road roughness measurement" Reporte para el Banco Mundial. Highway Safety Research Inst. Universidad de Michigan. Reporte No. UM-HSRI-81-28.
22. Sayers, M., Gillespie, T.D. y Queiroz, C.A., 1984 'International experiment to stablish correlation and standard calibration methods for road roughness measurements". Reporte para el Banco Mundial, Volúmenes 1 y 2. Reporte No. UMTRI-84-12-1/2.
23. SHRP 5014 'Road profile measurement", 1992. Strategic Highway Research Program. Washington.
24. SHRP 5011 'PROFCAL Program- Profile quality assurance", 1992. Strategic Highway Research Program. Washington.
25. SHRP 5012 'PROFCHCK Program- Profile quality assurance", 1992. Strategic Highway Research Program. Washington.
26. SHRP 5013 'PROFSCAN Program- Profile quality assurance", 1992. Strategic Highway Research Program. Washington.
27. Williamson, B., 1990 'Profilometer workshop held in Texas" FOCUS. Strategic research program. Washington. Abril 1990.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatépetl 506 B
Col. Xoco
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4 + 000, Carretera
Los Cues - Galindo
76700 Sanfandila, Qro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71