EVALUACIONES DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL CON REGLA DE TRES METROS, VIAGRAFO E IRI

RAMON CRESPO DEL RIO (*)
IGNACIO SANCHEZ SALINERO (**)

RESUMEN. El artículo presenta la evaluación de la regularidad superficial de perfiles teóricos con la Regla de Tres Metros, Viágrafo e IRI. Los resultados demuestran que de los indicadores analizados el IRI es el que mejor representa las percepciones de los usuarios y es adecuado para la recepción de carreteras y para la programación de las actuaciones de conservación de la red. Las aplicaciones de los otros indicadores se reducen al control de la geometría de las capas del firme durante la ejecución, empleo para el que también es válido el IRI.

ABSTRACT *Roughness evaluations of a set of theoretical profiles with Three Meter Rolling Straightedge, Viagraph and IRI (International Roughness Index) is analyzed in this paper. The results show that of the indicators analyzed, the IRI is the one that best represents the users perceptions and is the most suitable for use in roads and the maintenance of the network, while the usefulness of the others is limited to controlling the geometry of the surface layers during the construction, a use for which the IRI is also valid.*

1. INTRODUCCION

Se conoce por regularidad superficial la característica de las carreteras que produce movimientos no deseados, principalmente verticales, en los vehículos que circulan por ellas y que afecta a los ocupantes, de forma que cuando la regularidad no es adecuada la circulación es incómoda, antieconómica y, llegado el caso, insegura. La regularidad superficial está determinada principalmente por el perfil longitudinal de la carretera, aunque el tipo y estado del vehículo y la velocidad de circulación también influyen en la generación de estos movimientos indeseados.

De las distintas componentes del perfil longitudinal se considera que sólo inciden en la regularidad superficial aquellas con longitudes de onda comprendida entre 0,5 y 50 metros.

Existen varios métodos de medida y valoración de la regularidad superficial de las carreteras. Cada método suele emplear un instrumento de medida y un parámetro para caracterizar la regularidad superficial. Entre los equipos utilizados se encuentran desde los más sencillos como la Regla de Tres Metros (R3M) o el Viágrafo, hasta los sofisticados perfilómetros dinámicos, como el APL (Analyseur de Profil en Long), o el SDP (Surface Dynamic Profilometer).

En España los más utilizados son la Regla de Tres Metros, el Viágrafo y el APL, aquí llamado ARS (Analizador de la Regularidad Superficial). Este último, junto con otros como el Dipstick, Remolque BPR, también conocido como Rugosímetro, el RST (Road Surfade Tester), etc., sirven para obtener el Indice de Regularidad Internacional, IRI, recientemente incorporado a la normativa española y cuya descripción se realiza más adelante.

El trabajo que se presenta, forma parte de un proyecto más amplio que estudia y examina los aspectos técnicos, económicos, de gestión y conservación derivados del estado de la regularidad superficial de las carreteras. Se exponen, para una serie de perfiles tipificados y sencillos, los resultados de valorar la regularidad superficial con los tres indicadores de mayor uso en España:

1. Desnivel medido con la Regla de Tres Metros,
2. Coeficiente de Viágrafo,
3. IRI.

2. LOS EQUIPOS DE MEDIDA

2.1. LA REGLA DE TRES METROS (R3M)

La descripción de la Regla de Tres Metros y el método de uso se encuentra en la norma de ensayo NLT 334/87 del CEDEX (referencia 1). En esencia, el aparato consiste en una viga rígida de tres metros de longitud apoyada en sus extremos en dos ruedas, y un sistema de

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Sector de Tecnología y Estudios del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPU).
(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M. Sc., Ph. D. Jefe adjunto del Departamento de Construcción de GEOCISA (Madrid).

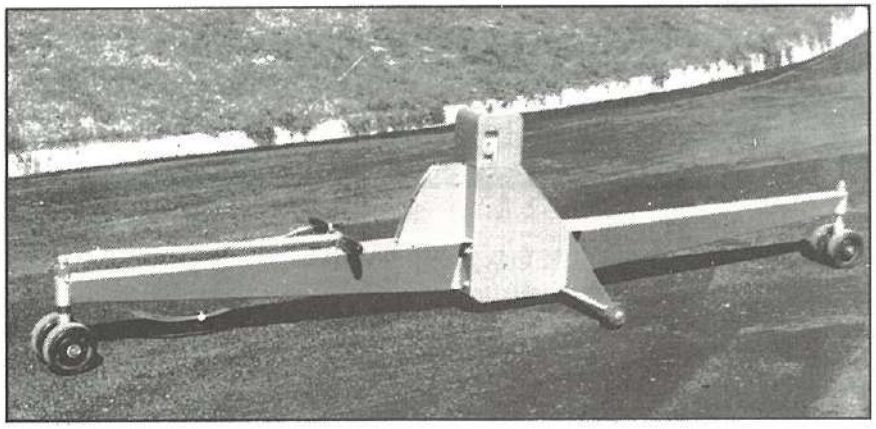

FIGURA 1.

medida del desnivel existente entre el punto medio de la recta definida por los dos puntos de apoyo de las ruedas y la ordenada del perfil de la carretera correspondiente a dicho punto medio (figura 1).

El sistema suele llevar un medidor del desnivel, con un campo de medida igual o superior a $\pm$ 10 mm, indicadores luminosos que se encienden cuando se superan unos umbrales determinados, y un recipiente con pintura para marcar en el pavimento los puntos que no cumplen la especificación. Algunos modelos proporcionan un registro gráfico, generalmente sobre papel, aunque los más sofisticados pueden llevar un pequeño ordenador donde los datos se almacenan en registro magnético.

Los desniveles que se miden con la Regla de Tres Metros no son un fiel reflejo del perfil longitudinal de la carretera (medido con respecto a un sistema de referencia absoluto), sino que lo son con respecto al plano definido por los dos puntos de apoyo de la regla. Este plano de referencia es relativo y varía de un punto de medida a otro.

Dadas las características mecánicas del aparato, el «perfil» obtenido con la R3M resulta, en algunas zonas, amplificado respecto al perfil de la carretera, mientras que en otras resulta atenuado. Para establecer qué componentes son amplificados y cuáles atenuados es importante conocer y analizar la curva de respuesta (o función de transferencia) de la R3M.

Se entiende por curva de respuesta de equipo de medida de perfiles longitudinales la razón de la ordenada medida por el equipo a la ordenada real de un perfil sinusoidal (armónico) de longitud de onda determinada, λ. Es evidente que la curva de respuesta depende de la longitud de onda del perfil sinusoidal. Es fácil comprobar que la curva de respuesta de la regla de tres metros viene definida para cualquier longitud de onda por la siguiente expresión:

$$H_{R3M}(\lambda) = 1 - \cos\left(3\,\frac{\pi}{\lambda}\right) \qquad (1)$$

En la figura 2 se ha representado la Curva de Respuesta de la R3M. Como puede observarse, resultan atenuadas todas las irregularidades con longitudes de onda superiores a seis metros y muchas con longitudes de onda inferiores a dos metros.

2.2. EL VIAGRAFO

La descripción y método de uso del Viágrafo se encuentra en la norma NLT 332/87 del CEDEX (referencia 1). En rasgos generales el equipo se compone de una estructura mecánica que lleva 8 ruedas y cuatro balancines que dan soporte a la estructura, y una novena rueda de medida en el centro del mecanismo que se mueve independientemente y que permite obtener el desnivel de la carretera con respecto al plano medio (o línea media) definido por las ocho ruedas (figura 3). El equipo se utiliza remolcado por un vehículo que circula por el pavimento a baja velocidad para evitar los efectos dinámicos.

Al igual que la Regla de Tres Metros, el Viágrafo presenta una curva de respuesta que no es plana. Es fácil demostrar que la curva de respuesta viene definida por la siguiente expresión:

$$H_V(\lambda) = 1 - \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}\cos\left[(2i-1)\cdot L\ \frac{\pi}{\lambda}\right] \qquad (2)$$

en donde L es la separación entre ruedas consecutivas. El Viágrafo empleado en España tiene una longitud de 9,31 m (L 1,33 m).

En la figura 4 se ha representado la curva de respuesta del Viágrafo. Como puede observarse, la función de transferencia presenta una sensible mejora con respecto a la R3M. Sin embargo, siguen atenuadas las irregularidades con longitud de onda superiores a 10 metros y tratadas indiscriminadamente aquéllas con longitud inferior a 2 metros.

2.3. EQUIPOS PARA LA MEDIDA DEL IRI

Se engloban dentro de este apartado una serie de equipos que proporcionan una representación precisa del perfil longitudinal. La curva de respuesta es prácticamente plana, al menos en la gama de longitudes de onda comprendidas entre 1 y 30 m. A este grupo de perfilómetros pertenecen equipos tan dispares como los

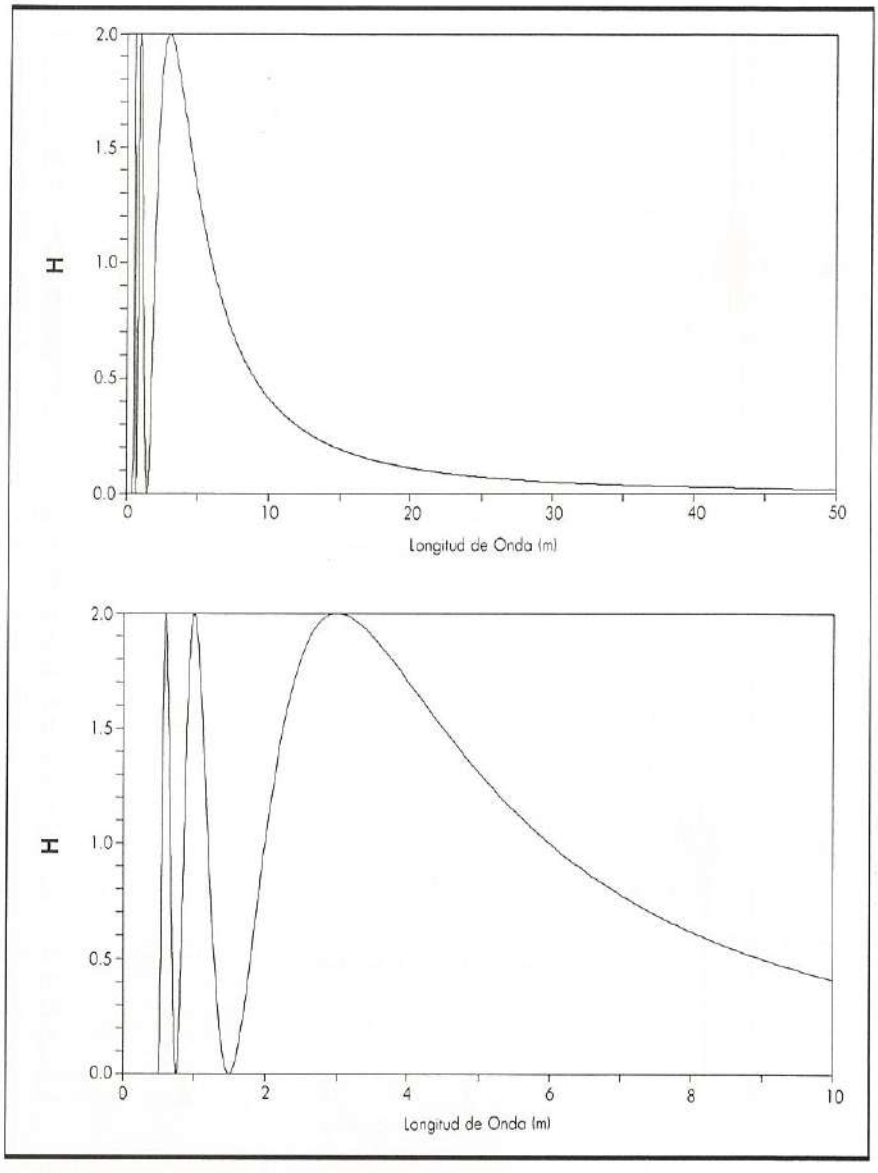

FIGURA 2. Función de transferencia. Regla de 3 metros.

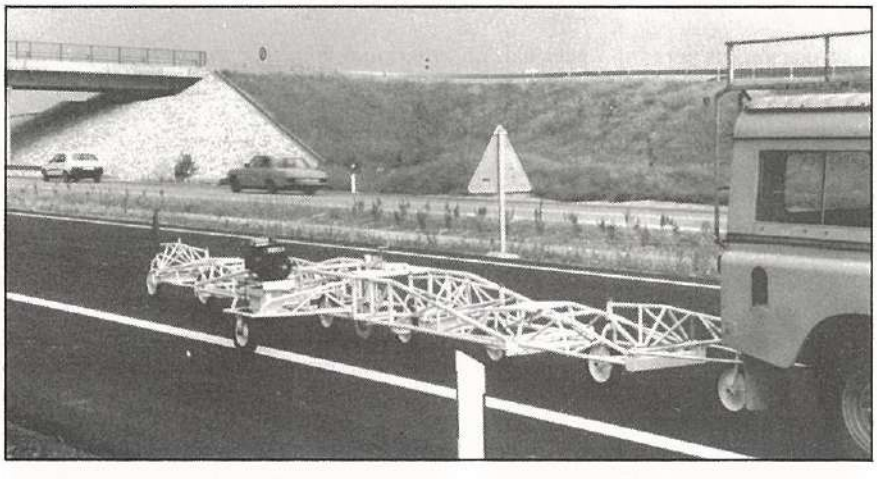

FIGURA 3.

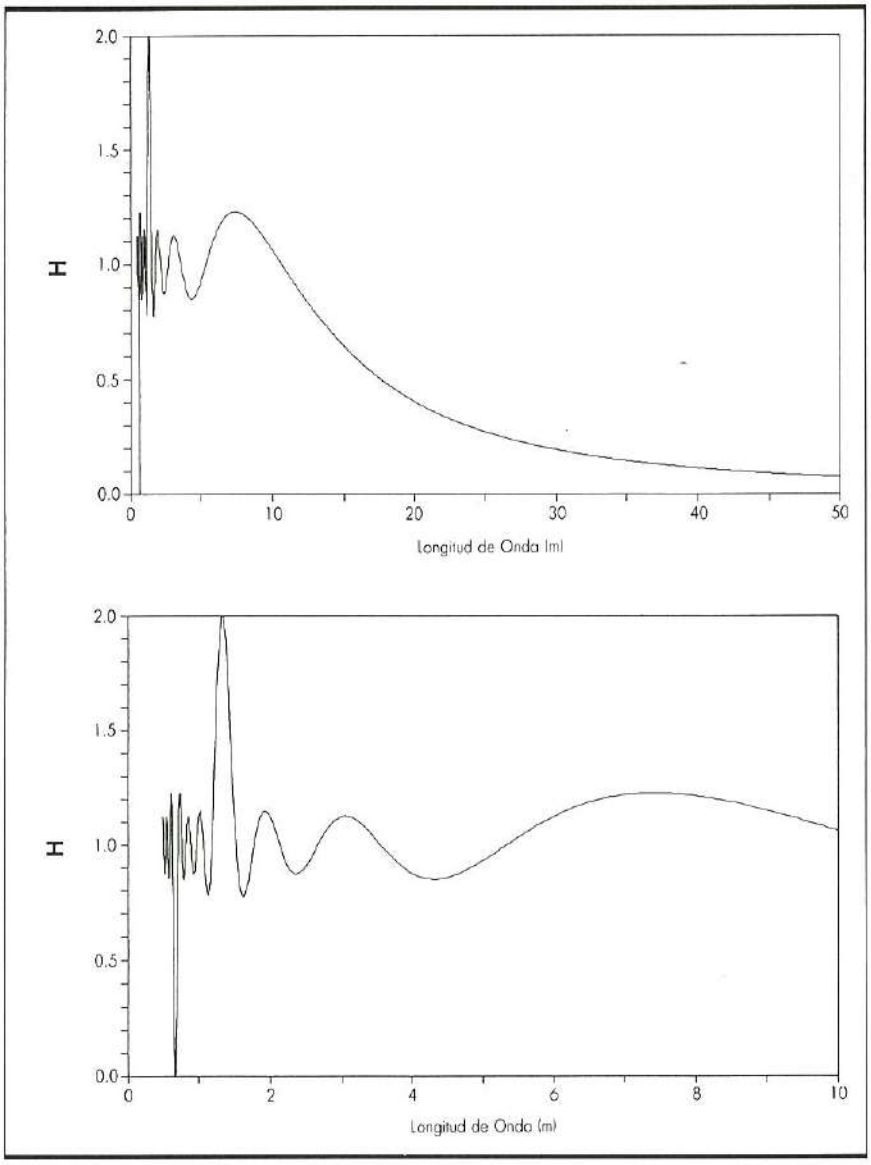

FIGURA 4. Función de transferencia. Viágrafo

tradicionales equipos topográficos de nivelación, los perfilómetros tipo SDP, los tipo APL y el Dipstick. Como resulta evidente, la función de transferencia de los métodos topográficos es totalmente plana ($H = 1$) para todas las longitudes de onda iguales o superiores al doble de la separación entre los puntos que se nivelan; en el caso del Dipstick la función de transferencia es $H = 1$ para longitudes de onda superiores a 0,6 metros (el doble del paso de medida).

Asimismo, y a efectos de las conclusiones que se tratan de resaltar en este artículo, se pueden considerar dentro de este grupo una serie de equipos de medida de la Regularidad Superficial conocidos con el nombre de equipos «Tipo Respuesta», siempre que proporcionen una medida adecuada del Indice de Regularidad Internacional. En este grupo se pueden incluir el Bump Integrator, el Rugosímetro, el Maysmeter, etc. Es necesario recalcar que es muy difícil conseguir con estos equipos una medida adecuada del IRI ya que es necesaria una perfecta y delicada calibración.

3. LOS INDICADORES DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL

3.1. COEFICIENTE DE LA REGLA DE TRES METROS, C_{R3M}

La medida directa de las irregularidades de la carretera con la regla de tres metros es el indicador de regularidad superficial más sencillo y más corrientemente utilizado en España. El término «medida directa» significa que el valor (de la ordenada del perfil) obtenido con la

R3M (no el valor real de esa ordenada) es el indicador en cada punto a comparar con la especificación de regularidad. La validez y representatividad de este indicador como medida correcta de la regularidad superficial es asunto cuya discusión no se pretende abordar en el presente trabajo. En lo sucesivo se denomina Y_{R3M} al desnivel medido con la Regla de Tres Metros, y coeficiente de la *R3M*, C_{R3M}, al valor de la flecha máxima de cada irregularidad.

3.2. COEFICIENTE DE VIAGRAFO, CV

Se define como coeficiente de Viágrafo, CV, al doble del área comprendida entre el eje de las abscisas y la curva del perfil obtenido por el Viágrafo, expresada en decímetros cuadrados y calculada cada 100 m.

Siendo $Y_V(x)$ el valor de la ordenada del perfil medido por el Viágrafo en cada punto de abscisa x, la ecuación que determina el coeficiente de Viágrafo es:

$$CV = 2 \int_0^d | Y_V(x) | \, dx \qquad (3)$$

donde d = 1000 dm e $Y_V(x)$ se ha de expresar en decímetros.

Esta definición del coeficiente de Viágrafo es inequívoca y su cálculo no debería presentar problema especial. La determinación de su valor se puede abordar mediante la solución exacta de la integral correspondiente o mediante técnicas aproximadas de integración numérica. Es importante mencionar que distintos méto-

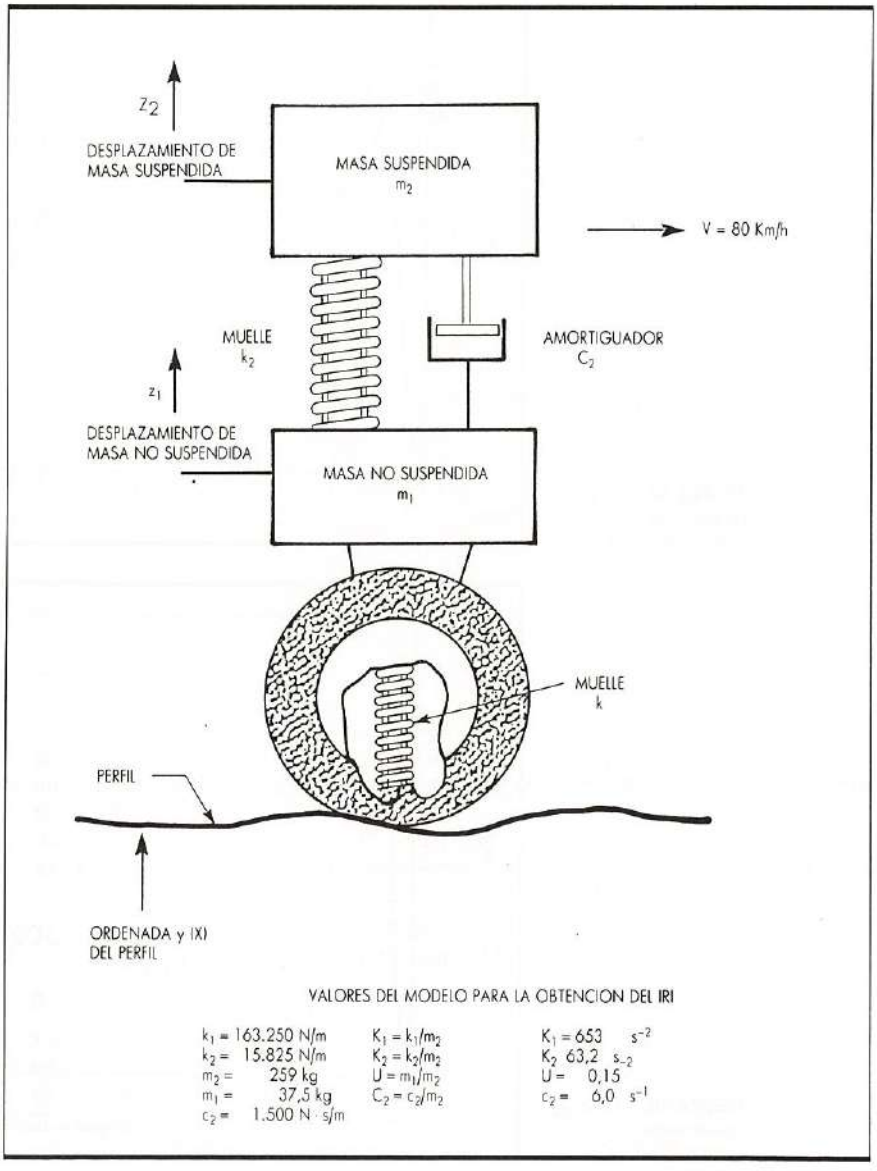

FIGURA 5. Modelo de cuarto de coche. Golden Car.

dos aproximados de integración pueden conducir a valores sensiblemente diferentes de coeficiente de Viágrafo, especialmente para valores pequeños de los desniveles medidos. Esta cuestión, de cierto interés, no se aborda en este trabajo. Los valores del coeficiente de Viágrafo que se presentan en el artículo, han sido calculados utilizando técnicas exactas de integración.

3.3. INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL, IRI

Con el objeto de establecer una escala única de valores de la regularidad superficial a la que pudieran referirse las medidas efectuadas por la gran mayoría de los equipos que existen en la actualidad, ha sido definido el IRI o Indice de Regularidad Internacional.

Para definir el IRI se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y masas de la cuarta parte de un vehículo tipificado que circula a 80 km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar. Los parámetros que definen las masas, rigideces y amortiguaciones de este vehículo, conocido como «Golden Car», se presentan en la figura 5.

Para calcular exactamente el IRI es necesario conocer el perfil longitudinal de la carretera. En dicho caso se define el IRI como:

$$\mathrm{IRI} = \frac{1}{L}\int_0^L \left| z_2' - z_1' \right| dx \qquad (4)$$

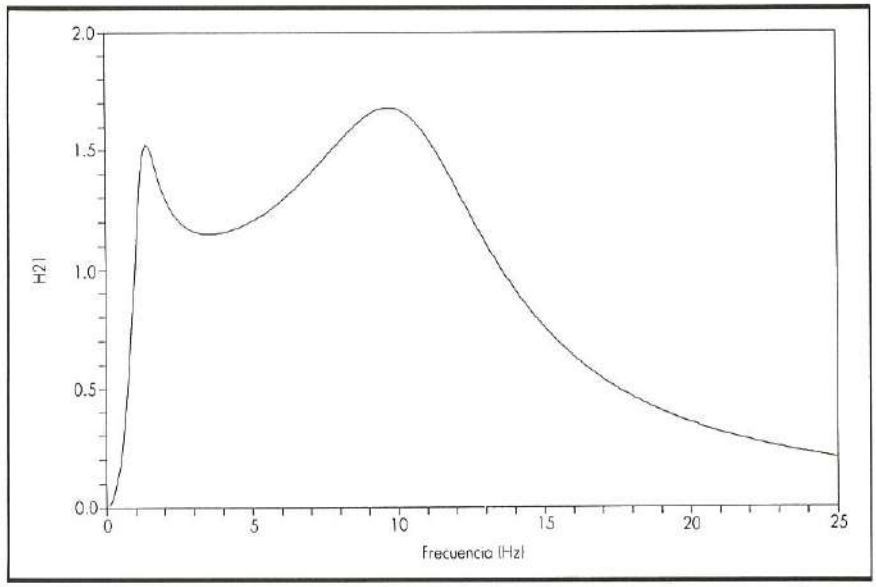

FIGURA 6A. Función de transferencia. Golden Quarter Car.

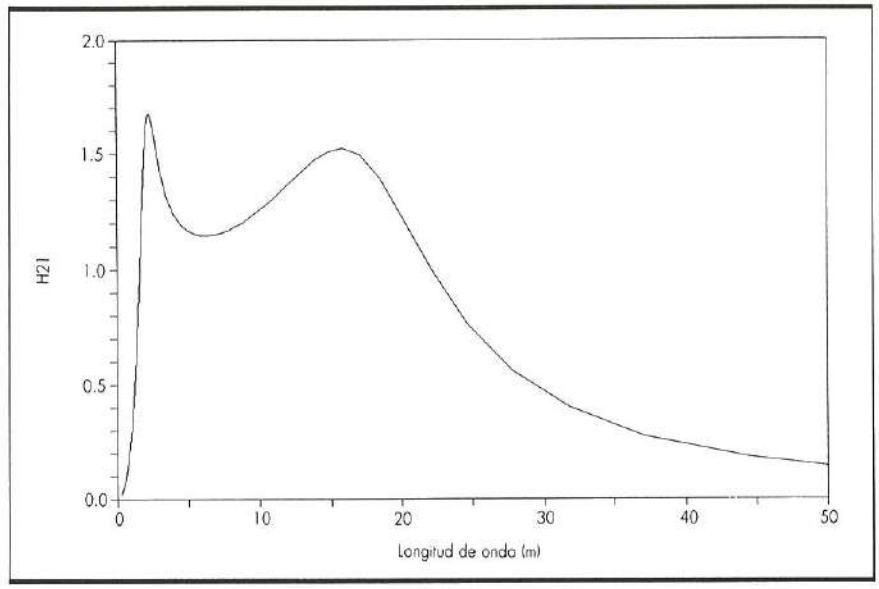

FIGURA 6B. Función de transferencia. Golden Quarter Car.

donde L es la longitud de valoración del IRI (100 m en España), z_1 y z_2 representan los desplazamientos verticales de las masas 1 y 2 que se muestran en la figura 5, y z'_1 y z'_2 las respectivas derivadas especiales (referencias 2 y 3).

Es conveniente definir como funciones de transferencia H_1 y H_2 los desplazamientos producidos en las masas 1 y 2 (del modelo de cuarto de coche) por un movimiento armónico de frecuencia f y amplitud unitaria, aplicado en la base del neumático. A su vez, la función de transferencia de la diferencia de desplazamientos, $z_2 - z_1$, es $H_{21} = H_2 - H_1$. Se puede demostrar que el módulo de la función de transferencia H_{21} para los parámetros del Golden Quarter Gar presenta la forma de la figura 6A.

Dado que la definición de IRI requiere que el modelo de cuarto de coche circule por el perfil a la velocidad de 80 km/h, es conveniente sustituir la frecuencia, f, por la longitud de onda λ mediante la expresión $\lambda = V/f$; en donde $V = 22{,}22$ m/s (80 km/h) y f, frecuencia en Hertzios. En la figura 6B se representa la función de transferencia para este último caso.

4. EVALUACIONES PARA PERFILES SINUSOIDALES

Como base de estudio comparativo de los resultados obtenidos con los distintos indicadores mencionados en el apartado anterior, se suponen una serie de curvas sinusoidales representativas de perfiles longitudinales teóricos de la carretera, definidas por la siguiente ecuación:

$$y(x) = A \operatorname{sen}\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \qquad (5)$$

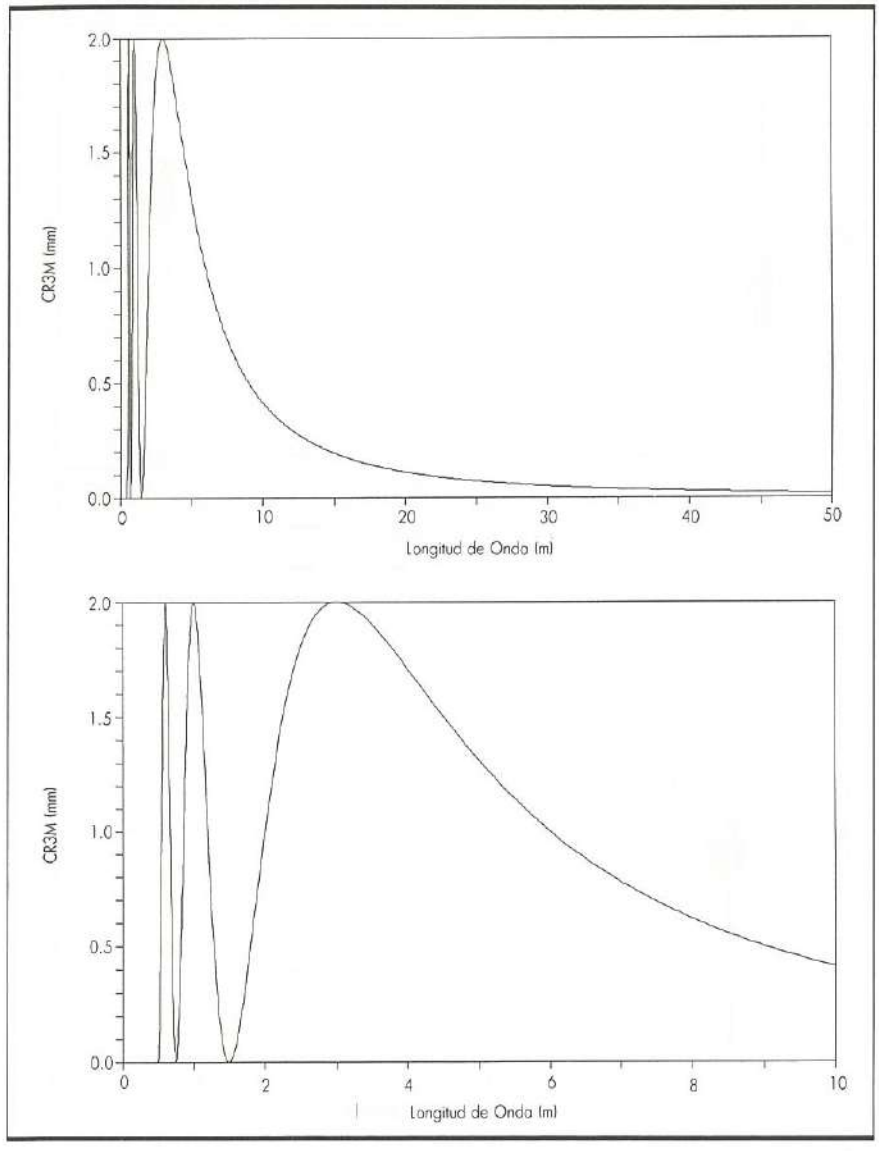

FIGURA 7. Regla de Tres Metros. Perfiles Sinusoidales.

en donde x es la distancia recorrida, λ la longitud de onda de cada perfil considerado, y A la amplitud de la desnivelación o irregularidad del perfil.

4.1. APLICACION A LA REGLA DE TRES METROS

Se deduce automáticamente de la definición de función de trasferencia que el desnivel medido por la regla de tres metros para el caso de los perfiles sinusoidades, Y_{R3M}, viene dado por el valor de la función de transferencia, a la longitud de onda correspondiente, multiplicado por la ordenada del perfil. Por tanto:

$$Y_{R3M}(\lambda) = y(x) \cdot H_{R3M}(\lambda) \qquad (6)$$

El coeficiente de irregularidad de la *R3M*, C_{R3M}, es el valor de la flecha máxima del sinusoide resultante:

$$C_{R3M} = A \cdot H_{R3M} \qquad (7)$$

4.2. APLICACION AL VIAGRAFO

El cálculo de los valores de los coeficientes de Viágrafo se obtiene muy sencillamente utilizando la noción de curva de respuesta. El valor de las ordenadas medidas con el Viágrafo en un perfil sinusoidal con longitud de onda λ es:

$$Y_V(x) = H_V(\lambda) \cdot y(x)$$

Es fácil demostrar, utilizando la definición de coeficiente de Viágrafo, ecuación (3), y la ecuación anterior, que el valor para perfiles sinusoidales es:

$$CV = \frac{4000A}{\pi} \cdot H_V \qquad (8)$$

en donde A se expresa en decímetros.

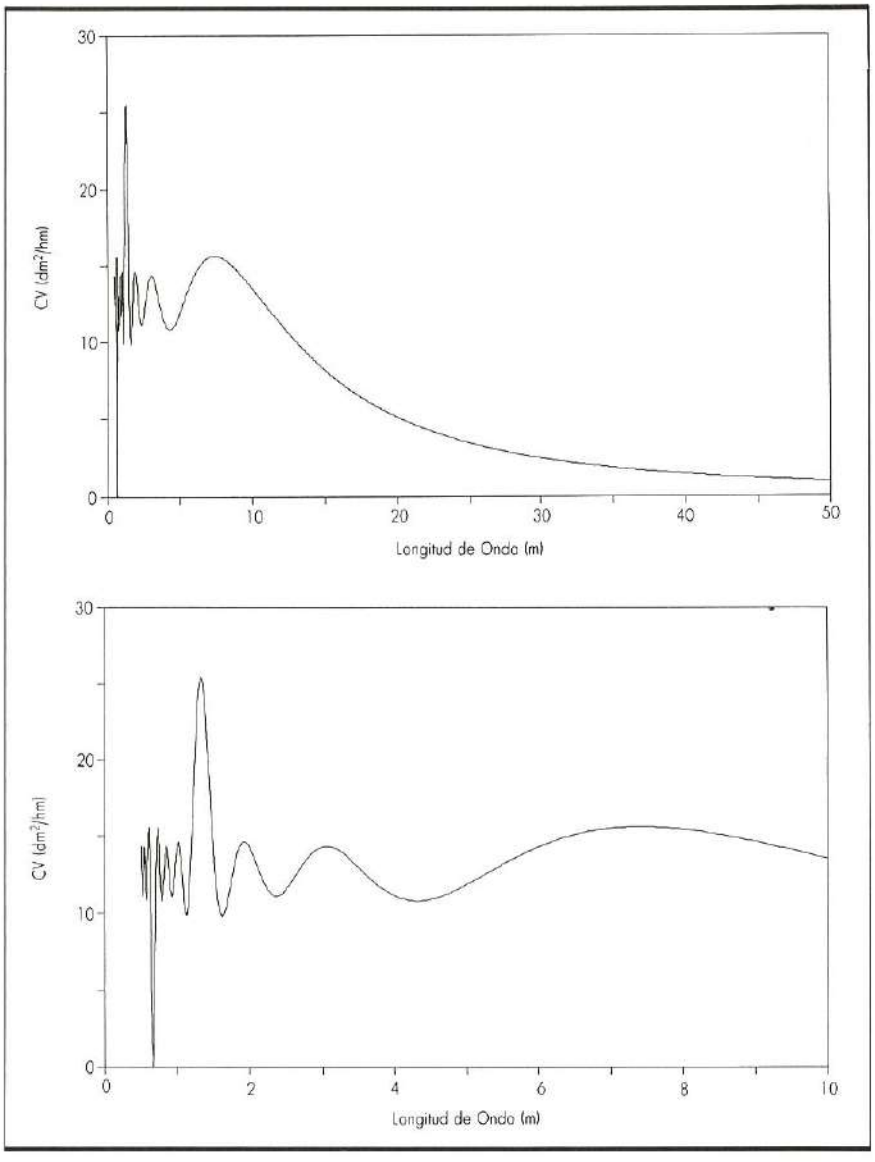

FIGURA 8. Viágrafo. Perfiles Sinusoidales.

4.3. APLICACION AL IRI

A su vez, para el cálculo del IRI es conveniente partir de la definición de funciones de transferencia de los desplazamientos de las masas del modelo Golden Gar expuesta en el apartado 3.3. Se puede comprobar que sustituyendo en la ecuación (4) que define el IRI, se obtiene, para el caso de perfiles sinusoidales de amplitud A y longitud de onda λ, la expresión:

$$\text{IRI} = 4 \cdot \frac{A}{\lambda} \cdot |H_{21}| \qquad (9)$$

5. COMPARACION DE RESULTADOS

Haciendo uso de las ecuaciones 7, 8 y 9 se han dibujado las figuras 7, 8 y 9. En ellas se representan los valores de la regularidad superficial que se obtiene con la Regla de Tres Metros, Viágrafo e IRI, para perfiles sinusoidales de cualquier longitud de onda y amplitud $A = 1$ mm. Para otras amplitudes se obtendrían multiplicando los valores correspondientes, deducidos de la curva respectiva, por la magnitud de la amplitud. Esto significa que los tres indicadores son directamente proporcionales a la amplitud del desnivel o irregularidad existente. Por ejemplo, un perfil sinusoidal con una longitud de onda $\lambda = 10$ m, tiene un $C_R3M = 0{,}4$ mm si la irregularidad es de amplitud $A = 1$ mm, y $C_{R3M} = 2$ mm (0,4*5) si la amplitud $A = 5$ mm. Igualmente, el IRI de la misma irregularidad ($\lambda = 10$ m) vale 0,5 m/km cuando su amplitud es 1 mm, y 2,5 m/km (0,5*5) si la amplitud es de 5 mm.

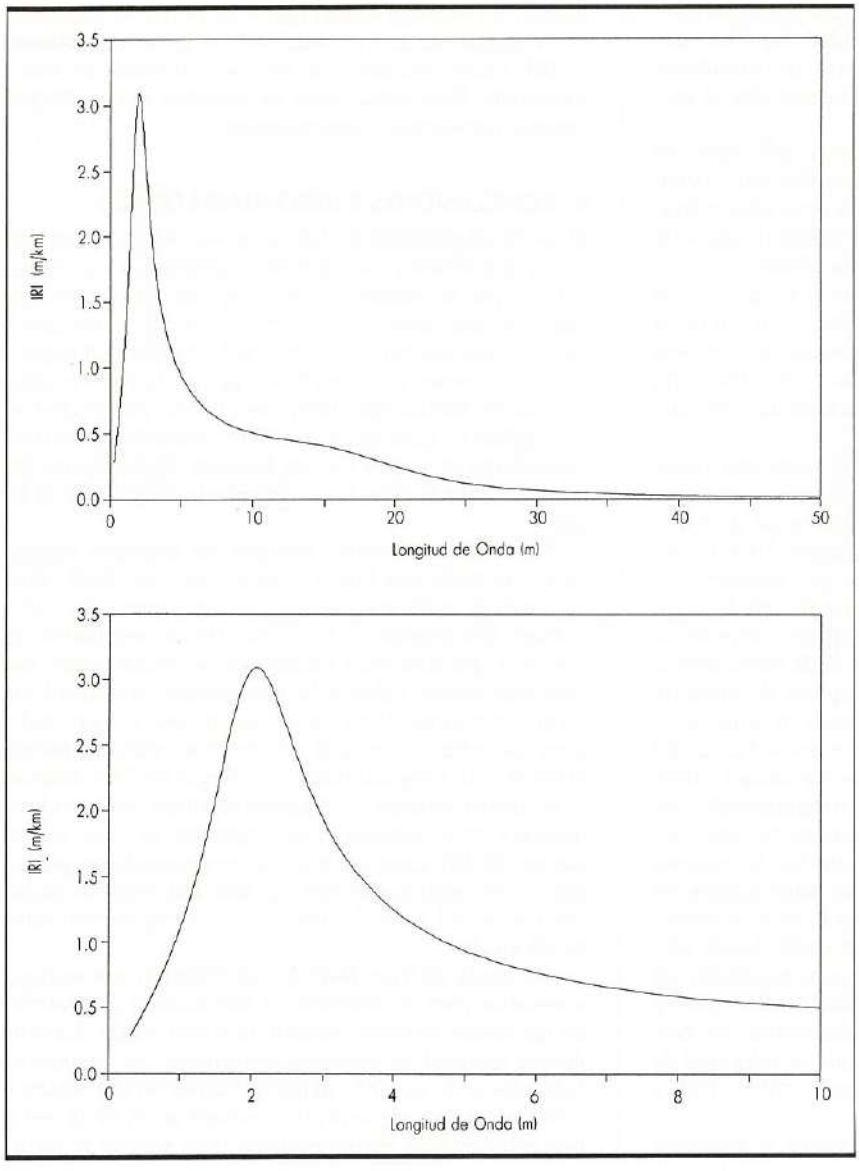

FIGURA 9. IRI. Perfiles Sinusoidales.

Se observa claramente en las figuras que los tres indicadores disminuyen rápidamente su valor a partir de una cierta longitud de onda.

El coeficiente de Regla de Tres Metros presenta un máximo de 2 mm para la longitud de onda 3 m y para valores inferiores tiene fluctuaciones entre 0 y 2 mm.

El coeficiente de Viágrafo se mantiene relativamente plano para longitudes de onda entre 2 y 10 metros, pero para las inferiores a 2 m presenta fuertes oscilaciones.

El IRI presenta un máximo muy acusado para las irregularidades con longitud de onda próxima a dos metros, y su disminución es muy notable a partir de longitudes de onda superiores a 30 metros.

Los tres indicadores tienen comportamientos semejantes para longitudes de onda largas ($\lambda > 15$ m), pero bastante diferente para las ondas medias ($5 \text{ m} < \lambda < 15$ m) y muy diferente para las ondas cortas ($0{,}5 \text{ m} < \lambda < 5$ m). Esta disparidad significa que no es probable hallar correlaciones entre los indicadores e incluso que no existe compatibilidad entre ellos al menos para ondas cortas y medias.

No resulta fácil saber cuál de los tres indicadores es más adecuado para valorar la regularidad superficial. En cada caso hay que tener en cuenta el alcance y limitaciones de cada indicador y el uso y concepto que se le quiere dar al término regularidad superficial.

Tanto el coeficiente de *R3M* como el coeficiente de Viágrafo están basados en la respuesta, al perfil de la carretera, proporcionada por mecanismos geométricos determinados (muy diferentes de los vehículos). En cambio, el IRI representa la respuesta de un «vehículo tipo» al circular por una carretera.

No parece razonable que la *R3M* trate con tanta diferencia irregularidades tan próximas como, por ejemplo, las de longitud de onda 0,75 y 1 m, o las de 0,5 y 0,6 m; o que el Viágrafo lo haga con las de 0,7 y 1,3 m. En cuanto al IRI se podría criticar que penalice tan severamente las irregularidades con longitudes de onda próximas a 2 m. Sin embargo, este criterio responde a que los vehículos como el GOLDEN CAR circulando a 80 km/h, son afectados por esta longitud de onda de manera muy notable (al corresponderse con la frecuencia de resonancia). Obviamente, si las características del coche son otras o si la velocidad de circulación fuese diferente a 80 km/h, no serían las irregularidades de longitud de onda 2 m las que más afectaran al vehículo.

Es claro que hay que seleccionar un tipo de vehículo y una velocidad estándar para hacer valoraciones de empleo general y que los elegidos por la técnica americana han sido el GOLDEN CAR y 80 km/h. Desde luego que no existe ninguna dificultad para establecer un «IRE» (Indice de Regularidad Español o Europeo) y aunque la elección del vehículo estándar podría ser objeto de cierta discusión, parece claro que la velocidad de referencia más representativa estaría entre 100 y 120 km/h.

Si se mantiene el vehículo y se cambia la velocidad de referencia (a 100 o a 120 km/h) se tendría la misma figura 9 pero desplazada hacia la derecha y las irregularidades más perjudiciales se situarían en torno a los 2,5 y 3 metros, respectivamente.

En lo que se refiere al uso de los indicadores hay que diferenciar dos casos: 1) control y recepción de obras, y 2) seguidamente del estado de la red de carreteras. Para el control de obras el uso de la Regla de Tres Metros o el Viágrafo de fácil manejo e interpretación, tiene ciertas ventajas basadas sobre todo en la tradición y en la carencia, hasta hace muy poco, de alternativas. La difusión internacional que ha alcanzado el IRI ha facilitado el desarrollo y comercialización de equipos de bajo coste y pequeño rendimiento, que permiten obtener el IRI durante la ejecución de las obras, caso del Dipstick.

Para la recepción definitiva de obras y para el seguimiento del estado y conservación de la red es necesario tener equipos de alto rendimiento que permitan obtener el IRI, único indicador (de los tres examinados) recomendable. Para estos fines se adaptan varios de los equipos mencionados anteriormente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El perfil longitudinal de las carreteras está compuesto de irregularidades con distintas longitudes de onda, aunque por lo general existen algunas longitudes de onda predominantes. Con objeto de valorar cómo afectan, se ha presentado el estudio de la regularidad superficial de carreteras con perfiles longitudinales formados por curvas sinusoidales (definidas por su amplitud A y su longitud de onda λ), mediante la obtención de los tres indicadores de mayor uso en España: 1) coeficiente de Regla de Tres Metros; 2) coeficiente de Viágrafo, y 3) el IRI.

No se han pretendido analizar los umbrales deseables para tener una buena regularidad superficial, sino las ventajas o inconvenientes que presentan unos indicadores con respecto a los otros. De los resultados se concluye que sólo para longitudes de ondas largas los tres indicadores valoran la regularidad superficial de forma semejante. Para las ondas medias y sobre todo para las ondas cortas cada uno de ellos evalúa de forma diferente las irregularidades. La Regla de Tres Metros y, en menor medida, el Viágrafo analizan indeterminadamente irregularidades con longitudes de onda semejantes. El IRI penaliza más las irregularidades próximas a dos metros que son las que más influyen en la circulación del vehículo tipo a la velocidad normalizada de 80 km/h.

La Regla de Tres Metros y el Viágrafo son equipos adecuados para el control de la terminación geométrica de las capas del firme durante la construcción. La tendencia mundial es hacia su sustitución por equipos e indicadores de uso más general, válidos en la construcción, recepción, seguimiento y conservación de la red y que resulten más representativos para valorar la regu-

laridad superficial desde el punto de vista de los usuarios, últimos evaluadores de la calidad de las carreteras de un país.

REFERENCIAS

1. Normas NLT. (1989). I. Ensayos de carreteras. Tomo 2. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX. Madrid.

2. SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D., y QUEIROG, C. (1986). The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements. Transportation Research Record, 1084. Washington, D.C.

3. SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D., y PATERSON, W. D. O. (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Technical Papers Number 46. The World Bank. Washington, D.C.

Nota aclaratoria. En el texto se hace referencia a varias demostraciones que no quedan recogidas expresamente. Todas han sido desarrolladas y comprobadas. Se decidió no incluirlas dada la extensión del cálculo de algunas de ellas, pero quedan a disposición de cualquier persona interesada en conocerlas. Algunas se pueden encontrar en la bibliografía especializada, en particular el desarrollo de la expresión algebraica de las funciones de transferencia, mientras que la aplicación a perfiles sinusoidales no se encuentra en la bibliografía, o al menos no ha sido detectada por los autores.