

Estudio de perfiles longitudinales mediante el análisis espectral.

Aplicaciones prácticas.

Tratamiento de los datos de la A7 para la representación del perfil y su análisis espectral

Por JULIO DEL POZO VELASCO
Ingeniero de Obras Públicas
y Licenciado en Ciencias Físicas

y

RAMÓN CRESPO DEL RÍO.
Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos



Detalle de ejecución de la capa.

1. Presentación

EN lo que sigue se presentan aplicaciones de las técnicas de análisis del perfil longitudinal de carreteras que suministran informaciones prácticas sobre la forma de ejecución del pavimento y sobre la calidad de rodadura.

El proceso se basa en obtener, mediante auscultación, una repre-

sentación digital del perfil longitudinal con una gran frecuencia de muestreo (como mínimo, un dato cada 10 cm), y aplicar al perfil así obtenido técnicas de análisis espectral basadas en la transformada de Fourier, que complementan y mejoran la información suministrada por el valor del IRI.

Se trata de un trabajo conjunto promovido por Autopista Concesionaria Española S.A. y desarrollado por AEPO S.A. Ingenieros Consultores.

Las técnicas aplicadas y las conclusiones derivadas del análisis realizado se consideran que pueden ser de interés para el colectivo relacionado con la carretera, y a tal efecto se ha preparado este artículo.

2. Objeto del estudio

Los perfiles de la calzada son percibidos de distinta forma por un vehículo ligero, un camión o un autobús. En este último caso, in-

“**E**l análisis espectral consiste en descomponer la característica que se estudia en su espectro o gama de frecuencias asociadas a la intensidad de cada frecuencia.”

cluso se percibe de distinta forma por las personas sentadas delante que por las que ocupan los asientos traseros.

En cada caso, el sistema de suspensión de la cabina del conductor respecto de los ejes es distinta: por ejemplo, un camión es capaz de percibir irregularidades molestas para el conductor que pasan desapercibidas para los vehículos ligeros, sobre todo si éstos circulan a bajas velocidades.

Dado que en la actualidad se dispone de equipos que nos ofrecen un perfil longitudinal suficientemente representativo de la calzada, parece que, aparte de obtener el IRI utilizando el modelo de cuarto de coche, se podría también efectuar un análisis espectral que pusiera de manifiesto y pudiera cuantificar estas sensaciones que se han descrito cualitativamente.

Así, en un tramo de proceso de regularización de la rasante, en la autopista A7, se observó que los camiones a una velocidad aproximada de 100 km/h, estaban sometidos a unas leves oscilaciones verticales con una frecuencia de unos 3 Hz, es decir, tres veces cada segundo, lo que equivale a percibir la irregularidad cada 9,3 m si se circula a 100 km/h, que hacían sospechar de la perfecta ejecución de la capa de regularización de la nueva rasante.

Teniendo en cuenta que la capa con espesor variable se controla con piquetes con una equidistancia de 10 m, podrán haberse originado unas crestas en los piquetes con valles entre ellos, producidas, por

TABLA 1			
Tramo	p.k. inicial	p.k. final	Carril
1a	147,360	136,500	Derecho (1)
1	147,360	136,500	Izquierdo (3)
2a	158,208	160,500	Derecho (1)
2	158,208	160,500	Izquierdo (3)
3a	160,500	158,320	Derecho (1)
3	160,500	158,320	Izquierdo (3)

ejemplo, por una falta de tensión en el cable respecto del peso del palpador de la extendidora; por el paso del palpador a través del piquete u otras causas.

Este efecto no era perceptible para los vehículos ligeros más que a altas velocidades y, en todo caso, de forma más amortiguada, que en los camiones.

3. Descripción de la auscultación realizada

Se han auscultado con el equipo *Video Láser RST* tres tramos de la Autopista A7. El objeto de la medida fue comprobar la regularidad superficial que se estaba obteniendo con la ejecución de una capa de regularización y otra de microaglomerado. La auscultación se realizó sobre la capa de regularización.

Los tramos medidos definidos por los PKs extremos y el carril ensayado se recogen en la *tabla 1*.

4. Parámetros medidos

Mediante el equipo indicado se obtuvieron los datos siguientes:

- IRI de la rodada derecha y de la rodada izquierda cada 20 y 100 m.
- Amplitud media (RMS) de las ondas cortas, medias y largas de la rodada derecha y de la rodada izquierda cada 20 m.
- Pendiente relativa de la rodada derecha y de la rodada izquierda cada 10 cm.

5. Análisis del IRI y de las amplitudes de las ondas cortas, medias y largas

Los resultados se entregan en listados y representaciones gráficas de cada tramo y carril, donde figuran los valores del IRI cada 20 y 100 m y los valores de las amplitudes (raíz media cuadrática en mm) de las ondas cortas (1-3 m), medias (3-13 m) y largas (13-40 m) obtenidas por el equipo.

TABLA 2				
Tramo	IRI (mm/m)	Ond. cortas (mm)	Ondas medias (mm)	Ondas largas (mm)
1a	1,48	0,12	1,41	4,28
1	1,45	0,12	1,38	4,35
2a	1,45	0,08	1,20	3,21
2	1,60	0,14	1,33	3,60
3a	1,61	0,10	1,34	3,45
3	1,30	0,10	1,09	2,75

La tabla 2 presenta los valores medios de cada tramo medido:

Es digno de mención que la amplitud de las ondas largas del tramo 1 es más elevada que en el resto de los tramos, al estar afectadas por la presencia de un viaducto de vigas, cuya contraflecha produce valores altos de las amplitudes de las ondas próximas a la longitud de las vigas (32 m). Observando los datos cada 20 m, se distingue claramente la situación del viaducto en el tramo a partir del análisis de ondas; asimismo, el análisis espectral permite observar este efecto de las contraflechas de las vigas en la regularidad superficial. Esto abre un campo nuevo para el estudio de la regularidad superficial sobre estructuras de determinada tipología y longitud.

6. Análisis espectral

Con objeto de determinar las longitudes de onda dominantes en el perfil resultado del proceso de extensión que se acababa de ejecutar, se decidió realizar un análisis espectral del perfil medido por el equipo láser RST.

El análisis espectral consiste en descomponer la característica que se estudia (en este caso, el perfil longitudinal resultante del extendido) en su espectro o gama de frecuencias (o, su equivalente en ingeniería de carreteras, las longitudes de onda) asociadas a la intensidad de cada frecuencia (intensidad que en ingeniería de carreteras viene representada por la amplitud).

Un ejemplo de uso frecuente y utilidad práctica de las técnicas de filtrado y análisis espectral es el dial de una radio, en el que se encuentran repartidas en un espectro de frecuencias las diversas emisoras. Mediante un proceso de análisis del espectro y filtrado, el usuario selecciona la frecuencia que corresponde a la emisora que desea oír.

El matemático francés J.B. Fourier (1768-1830) demostró que los procesos periódicos, y muchos que aun no siéndolo cumplen determinadas condiciones, se pueden descomponer en una suma infinita de senos y cosenos de diversas amplitudes.

En términos de Ingeniería de carreteras, esto quiere decir que el perfil (cualquier perfil) se puede reproducir como suma de ondas sinusoidales de diversas longitudes de onda y amplitud.

Mediante un desarrollo matemático se realiza la transformación de la serie de datos inicial (distancia, cota) (*datos en el dominio del tiempo*) en la serie de datos de salida (amplitudes, longitudes de onda) (*datos en el dominio de la frecuencia*) que le corresponden. La

mente en metros) y el eje de las Y las amplitudes (normalmente en milímetros), se obtiene la representación gráfica del espectro $x(\lambda)$.

Se suele representar en coordenadas logarítmicas o semilogarítmicas (decibelios).

La observación y la interpretación del gráfico del espectro permite al ingeniero de carreteras encontrar información no visible en representaciones convencionales del perfil, tales como defectos sis-



Equipo de medida RST-11.

transformación se puede realizar en continuo (si se dispone de la expresión analítica de la función que se quiere transformar) obteniendo la Transformada Continua de Fourier (TCF) o de forma discreta (caso del perfil muestreado) obteniendo la Transformada Discreta de Fourier (TDF).

La expresión matemática de la transformada de Fourier es: [ref. 1] (Eq1)

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Donde f = frecuencia (Hz) y t = tiempo (s).

El sistema tiempo - frecuencia es equivalente al sistema distancia - longitud de onda.

Dibujando en un sistema de coordenadas, donde el eje de las X sean longitudes de onda (normal-

temáticos, características de la extendidora, juzgar los procesos de ejecución (paradas entre camiones de extendido), detectar zonas singulares, conocer la magnitud de las ondas que más afectan al usuario o a la carretera, establecer umbrales de velocidades cómodas, incómodas o peligrosas, calificar la carretera con normas internacionales ISO 8608, etc.; es decir, obtener informaciones de utilidad para el ingeniero de carreteras. Una descripción más amplia del análisis espectral aplicado a perfiles de carreteras se puede ver en la referencia [2].

Para estudiar el espectro del perfil, se ha procedido de la forma siguiente:

Se preparan los ficheros de campo para realizar el análisis espectral kilómetro a kilómetro (fi-

cheros ASCII de una sola columna que contienen la cota del perfil cada 10 cm).

Se eliminan del perfil las componentes que no interesan para el análisis de la regularidad superficial (longitudes de onda mayores de 50 m); a tal efecto, al perfil medido se le aplica un filtro de Butterworth de orden 3, paso alto y frecuencia de corte de 0,004 ciclos/m, equivalente a filtrar las longitudes de onda superiores a 50 m.

Se obtiene un perfil útil para el análisis de la regularidad superficial, cuyo dominio por definición está comprendido entre 0,5 y 50 m (PIARC, 1987).

El proceso se ha realizado en varias fases:

1) Integrando la pendiente cada 0,1 m para obtener el perfil mediante la expresión:

$$\text{perfil}(n) = \text{perfil}(n-1) + \text{pendiente}(n) \cdot 0,1 \text{ (m)}$$

2) Filtrando el perfil; para ello el fichero anterior se utiliza como entrada del programa comercial *MATLAB for Windows 4.2* usando las funciones *butter* y *filter*.

Se dispone, por tanto, de ficheros con los datos del perfil preparados para el análisis espectral.

3) Los ficheros anteriores se utilizan como entradas del programa *IRIESPEC*, que obtiene la FFT (Transformada Rápida de Fourier) del perfil.

El espectro se dibuja en escala semilogarítmica, tomando como eje de las "x" las longitudes de onda en metros y como eje de las "y" las amplitudes en milímetros (en escala logarítmica); en los gráficos de espectros se complementan con la curva Amplitud - Longitud de onda deducida de la expresión siguiente:

$$(Eq2) \quad a_v = \frac{4A\pi^2 V^2}{\lambda^2}$$

Donde:

a_v = aceleración vertical de la masa superior (la que percibe el usuario).

V = velocidad en m/s.

A y λ amplitud y longitud de onda.

Se adopta como umbral de aceptación del perfil el valor $a_v = 0,5 \text{ m/s}^2$.

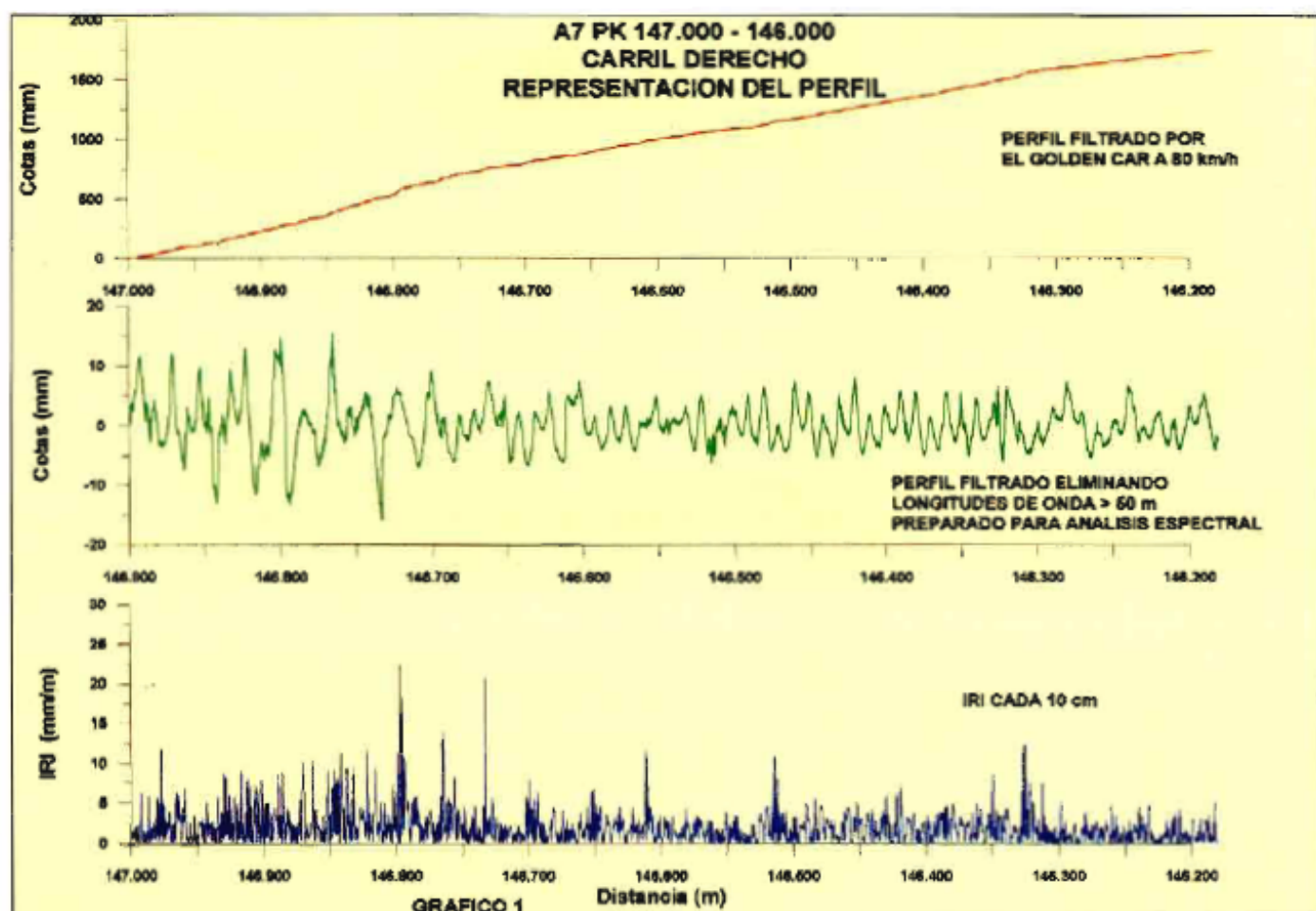
Se dibujan las curvas correspondiente a 80, 110 y 140 km/h.

7. Estudio de aceleraciones.

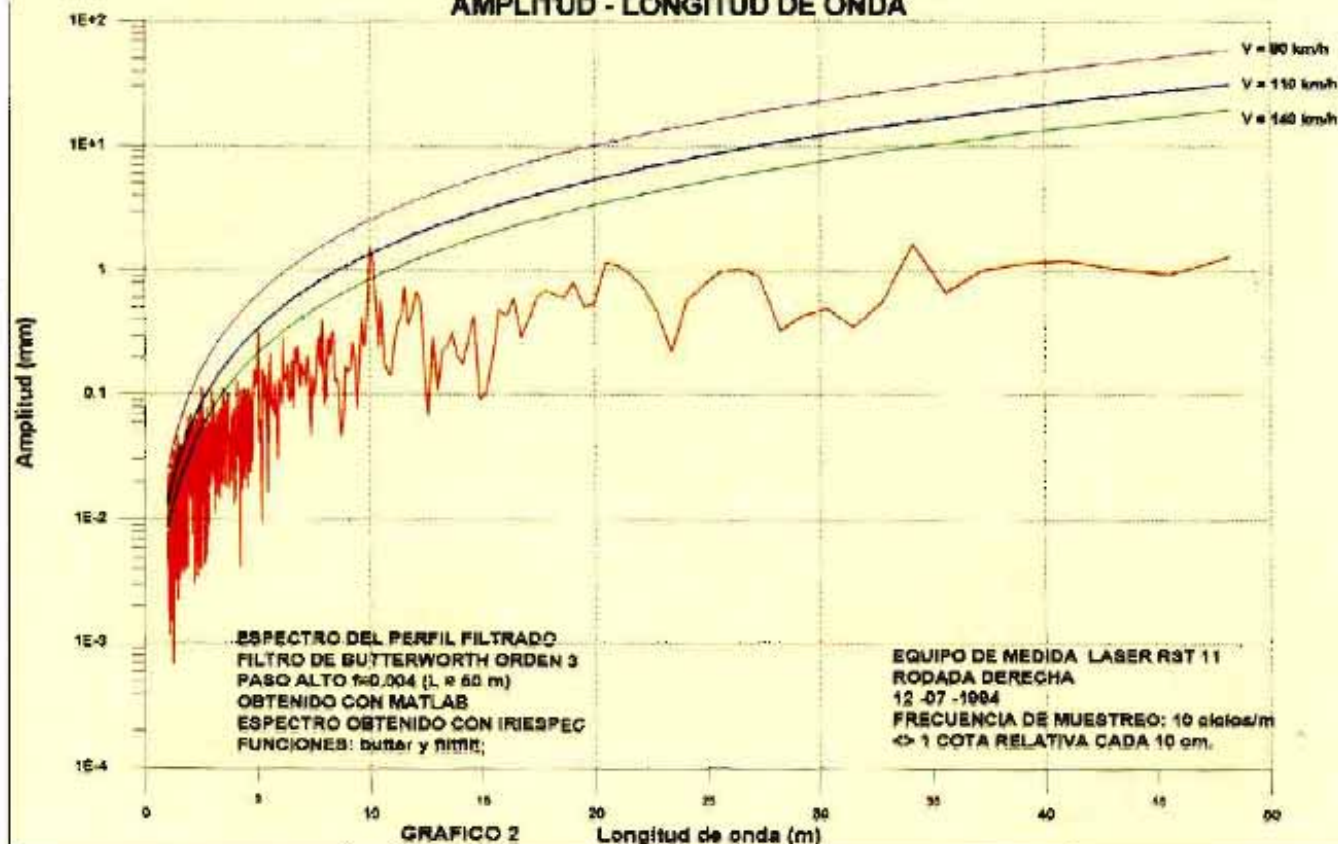
Mediante modelos de cálculo basados en la solución numérica de las ecuaciones del movimiento del cuarto de coche, se pueden estudiar las interacciones del perfil con el vehículo. Se consideró de interés realizar un breve estudio de las aceleraciones percibidas por el usuario, como consecuencia de circular por ese perfil. El estudio se realiza para un vehículo ligero (*Golden Car*) y para un camión, escogiendo para este último las constantes de la bibliografía. Se utilizaron las indicadas por la casa Pegaso para un camión de 2 ejes y 20 toneladas de PTC (Peso Total en Carga).

El programa *IRIACE* permite obtener la respuesta instantánea de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cualquiera de las masas del sistema.

Como resultado de aplicar el



A7 PK 147.000 - 146.000
CARRIL DERECHO
ANÁLISIS ESPECTRAL
AMPLITUD - LONGITUD DE ONDA



programa TRIACE a un fichero, que representa las cotas del perfil cada 10 cm, se determinan los valores de los siguientes parámetros:

- DISTANCIA
- IRI (mm/m)
- PERFIL DE LA MASA INFERIOR (mm)
- VELOCIDAD DE LA MASA INFERIOR (m/s^2)
- ACELERACIÓN DE LA MASA INFERIOR (m/s^2)
- PERFIL DE LA MASA SUPERIOR (mm)
- VELOCIDAD DE LA MASA SUPERIOR (m/s)
- ACELERACIÓN DE LA MASA SUPERIOR (m/s^2)

7.1. Estudio de aceleraciones del modelo de coche entero.

Dado que la respuesta negativa al perfil ejecutado ha sido más frecuente y notable en los camiones, se ha considerado de interés analizar de nuevo la aceleración vertical de la masa superior, ahora con un modelo de coche entero y en función de la batalla (distancia entre ejes).

Intuitivamente se ve que, a

igualdad de perfil, la respuesta de un camión es diferente a la de un turismo. Una forma de cuantificar dicha diferencia es introducir en el modelo de cuarto de vehículo los valores de las constantes (neumáticos, muelles y amortiguadores) apropiados a vehículos pesados. Otra variable que influye es la distinta distancia entre ejes (batalla) en los turismos y en los camiones.

El modelo de coche entero se encuentra descrito en la referencia [3].

Asimismo, se dispone de un programa de ordenador que permite obtener las respuestas dinámicas del vehículo entero incluidos los movimientos de "cabeceo" (giro de la masa superior respecto al eje horizontal transversal al vehículo) y "balanceo" (giro de la masa superior respecto al eje Y horizontal, longitudinal al vehículo).

Se obtiene mediante el programa FULLCAR la respuesta de la aceleración de la masa superior tomando como valores del modelo los indicados por la norma ASTM E 1170-91 "Standard Practices for Simulating Vehicular Response to

Longitudinal Profiles of a Vehicular Traveled Surface".

Se estudiaron dos casos: el primero con una batalla de 2,59 m (norma ASTM) y el segundo con distancia entre ejes de 5 m. Se dibujaron los gráficos correspondientes calculados cada 10 cm (un gráfico por batalla estudiada) y cada 100 m (un solo gráfico con las longitudes entre ejes estudiadas) y para todo el tramo 1a, de aproximadamente 11 kilómetros. No se presentan los resultados en este artículo.

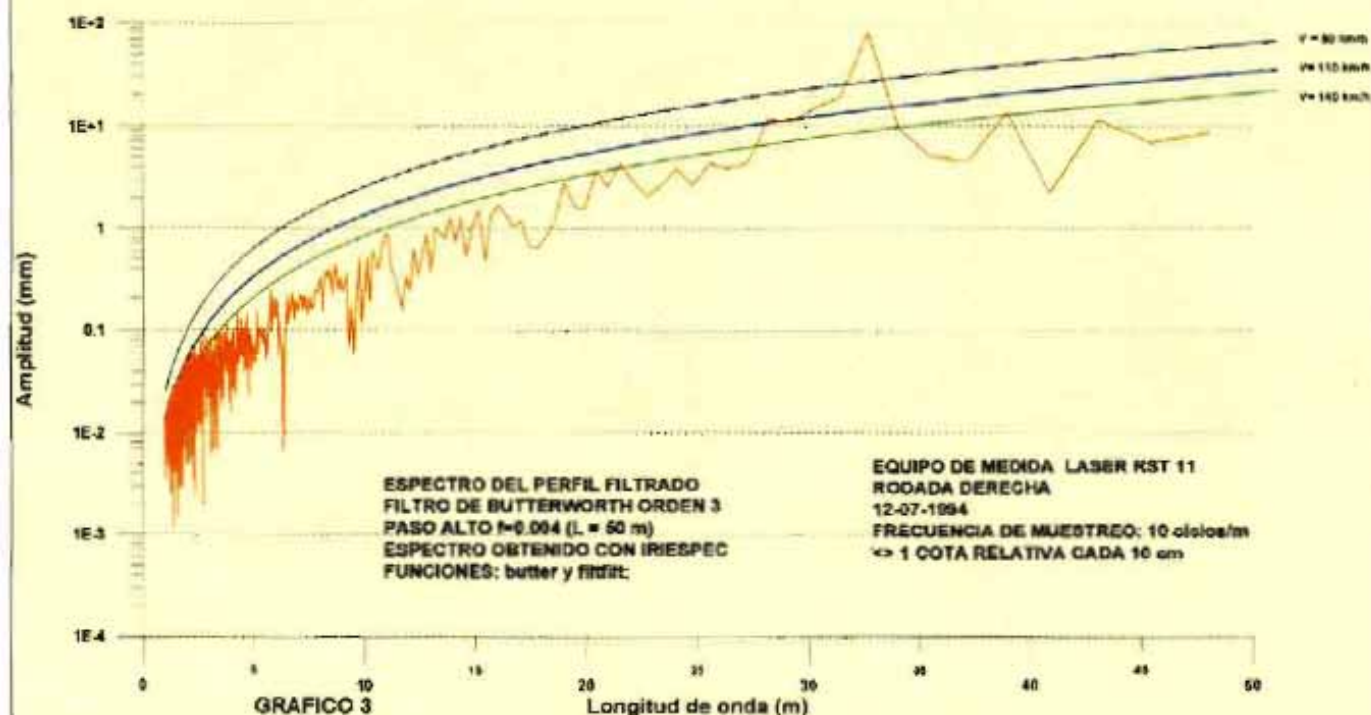
8. Presentación gráfica de la información.

Los datos se presentan en formato gráfico con el siguiente contenido:

Gráfico 1. Representaciones del perfil.

- El perfil medido por el modelo de cuarto de coche (Figura superior).
- El perfil filtrado con filtro de Butterworth de orden 3, paso alto, y frecuencia de corte de 0.004 ci-

A7 PK 138.000 - 137.000 CARRIL DERECHO ANÁLISIS ESPECTRAL AMPLITUD-LONGITUD DE ONDA



culos/m preparado para el análisis espectral (Figura intermedia).

- El IRI cada 0,10 cm (Figura inferior).

Gráfico 2. Representaciones del espectro. (página anterior)

- El espectro de amplitudes - longitudes de onda del perfil de la carretera filtrando las longitudes de onda superiores a 50 m.

- Curvas de percepción de irregularidades para velocidades de 80 - 110 - 140 km/h para un umbral de aceleración de 0,5 m/s².

Gráfico 3. Representaciones de la aceleración.

- Aceleración de la masa superior (m/s²).

- Resultados correspondientes a un vehículo ligero ("Golden Car").

- Resultados correspondientes a un camión Pegaso.

Gráfico 4. Representaciones de la aceleración.

- Aceleración de la masa inferior (m/s²) (Figura inferior).

- Aceleración de la masa superior (m/s²) (Figura intermedia).

- El valor del IRI camión (Figura superior). Resultados del camión Pegaso.

Estos gráficos se realizaron para cada kilómetro y todos los tramos. En cada hoja se presentó un kilómetro.

A la vista de los espectros obtenidos, se decidió profundizar el estudio en un único kilómetro, en concreto en el carril derecho del p.k. 147,0 al p.k. 146,0, al que corresponden las figuras que se incluyen en este artículo.

9. Análisis y comentarios de los resultados obtenidos.

Los resultados y gráficos presentados permiten comentarios y conclusiones de cierto interés a la hora de analizar la regularidad superficial y las técnicas empleadas para la mejora de dicha regularidad.

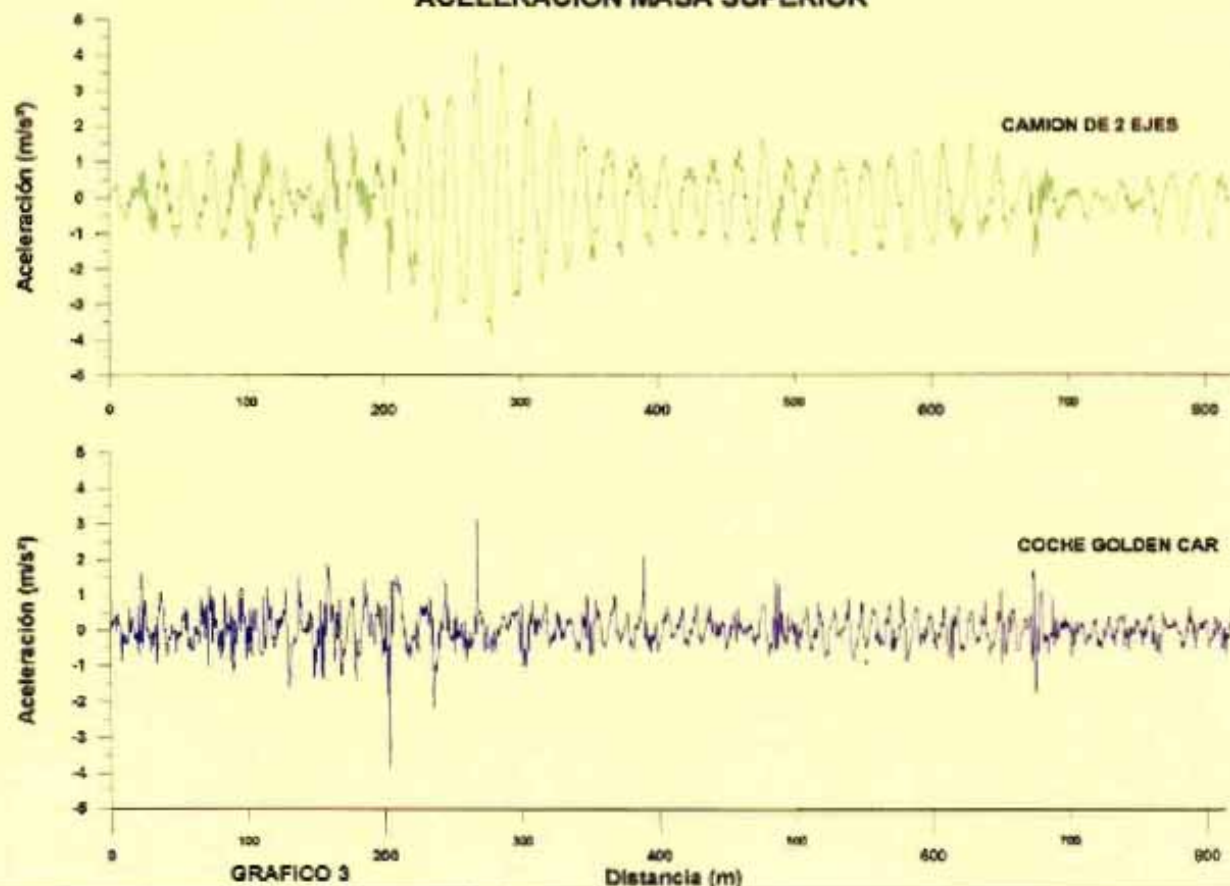
En primer lugar hay que indicar que los valores de IRI contempla-

dos a la luz de la normativa MOPTMA son correctos. Este hecho es sorprendente, pues parece que puede existir un perfil que cumpla la normativa vigente, que sea aceptable para la circulación de vehículos ligeros a velocidades normales de autopista, y que produzca ligeras molestias en los pesados.

La velocidad de circulación por una autopista es sensiblemente superior a 80 km/h y aunque el IRI a mayor velocidad es, a igualdad de irregularidad, menor ($IRI_{140} < IRI_{110} < IRI$), no sucede lo mismo cuando el criterio es limitar la aceleración vertical de la masa superior (que es la que percibe el usuario, despreciando el efecto del asiento).

Atendiendo a este parámetro, parece que puedan existir tramos con el mismo IRI y distinta composición frecuencial y, por lo tanto, distinta aceleración vertical, lo que indicaría que, a pesar de la gran utilidad del IRI como índice representativo de la regularidad superficial, existen determinados

A7 PK 147.000 - 146.000
CARRIL DERECHO
ACELERACION MASA SUPERIOR



efectos que no pueden ser explicados a través suyo, debiendo utilizarse el análisis espectral.

El gráfico 2 permite distinguir claramente el efecto de las irregularidades respecto a la velocidad. Las curvas dibujadas corresponden al criterio de limitar la aceleración vertical a $0,5 \text{ m/s}^2$, Ref (4).

También del mismo gráfico se puede deducir que la irregularidad correspondiente a la longitud de onda de 10 m, cuya amplitud según el espectro es ligeramente inferior a 2 mm, es la más acusada; se dice que existe un pico.

Estos picos, presentes en casi todos los tramos, solamente se intersecan con las curvas de velocidad en los puntos donde se han observado a nivel de usuario las mencionadas irregularidades. Estos defectos eran inapreciables a simple vista u observando el dibujo del perfil, pero el análisis espectral ha sido capaz de detectarlo y definirlo con toda claridad.

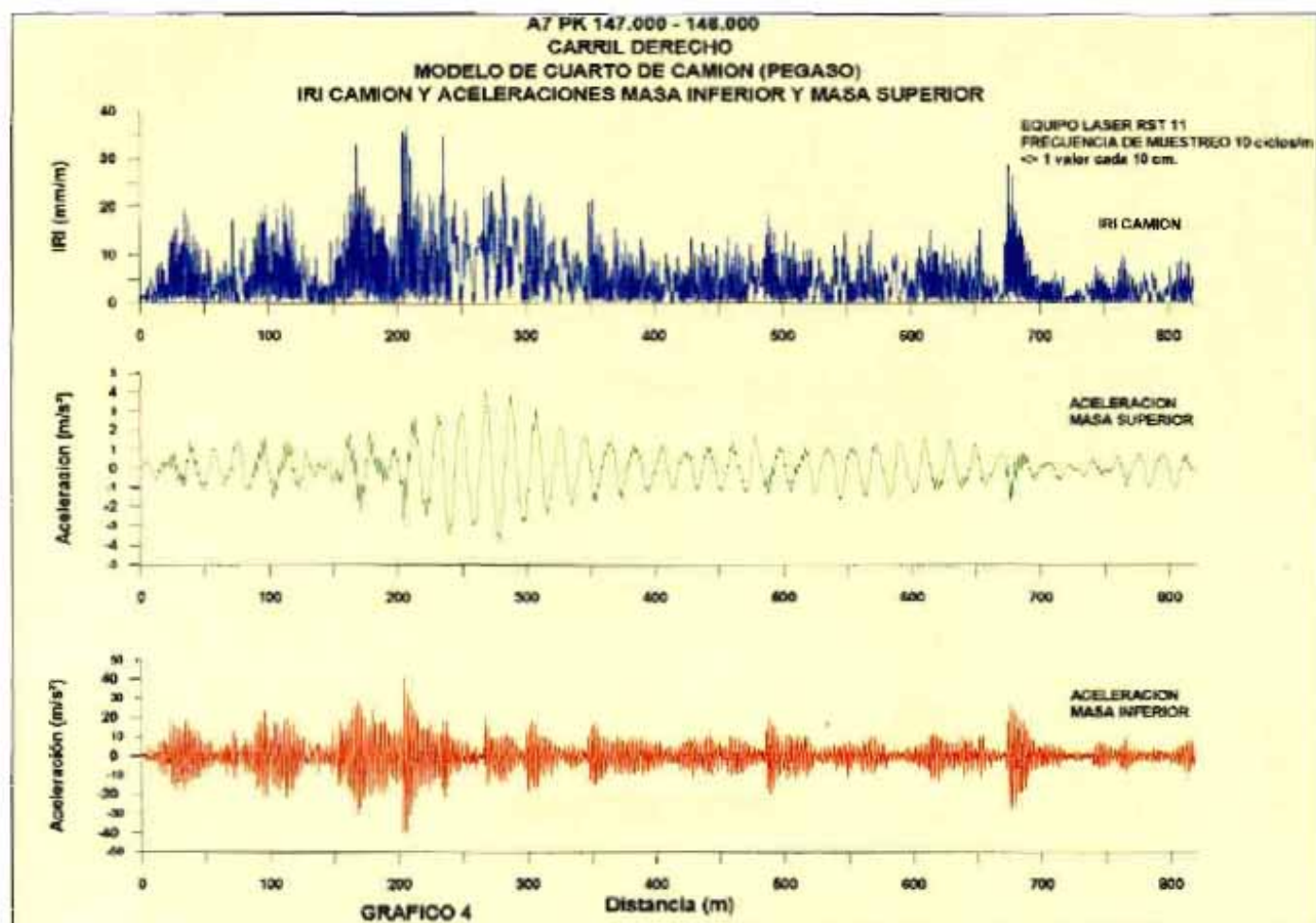
También la observación del mismo gráfico 2 permite comprobar el efecto de las irregularidades

del perfil en la velocidad de circulación. Si se circula a 80 km/h , el usuario no percibirá (la curva pasa por encima sin cortar -el usuario pasa sin sentir-) el pico de la irregularidad de 10 m de longitud de onda, mientras que a 110 km/h y, sobre todo, a 140 km/h el efecto será cada vez más acusado.

“También del mismo gráfico se pueden deducir que la irregularidad correspondiente a la longitud de onda de 10 m, cuya amplitud según el espectro es ligeramente inferior a 2 mm, es la más acusada; se dice que existe un pico.”

Si se observa el espectro del P.K. 138,0 a 137,0 (gráfico 2a) se percibe un pico de casi 10 cm amplitud en la longitud de onda de 35 m, que sin duda corresponde al efecto de contraflecha de las vigas de esta misma luz del viaducto situado en esa zona de la autopista. En esa (ver en el informe el gráfico de aceleraciones de todo el tramo 1) son mucho más perceptibles las aceleraciones, mientras que el IRI es bueno.

Los gráficos de aceleraciones permiten observar que hay valores puntuales donde la aceleración de la masa superior alcanza valores de 4 m/s^2 , sin que existan diferencias apreciables entre el coche y el camión (valor máximo para el coche: $3,89 \text{ m/s}^2$; valor máximo por el camión: $4,07 \text{ m/s}^2$), lo cual a simple vista parece sorprendente. Las aceleraciones de las masas inferiores son del orden de 10 veces las de la masa superior y hay más diferencias entre el coche y el camión (valor máximo para el coche de $29,1 \text{ m/s}^2$; valor máximo para el camión de $40,6 \text{ m/s}^2$). Los valores



máximos de IRI coinciden con las zonas de picos de aceleración, lo que es lógico; los valores máximos obtenidos son $IRI = 22.3 \text{ mm/m}$ $IRI_{camión} = 37.0 \text{ mm/m}^2$.

ACESA, a la vista de esta situación, decidió que la capa fina de espesor constante, prevista sobre la de regularización, se extendiera con una viga de 7 m acoplada a la extendidora. De esta forma se consiguió una regularización adecuada que solucionó estos efectos marginales que afectan básicamente al tráfico de camiones.

Referencias

- [1] *The Fourier transforms and its applications. Second Edition.* Ronald N. Bracewell. McGraw Hill. New York 1986.
- [2] "Análisis espectral de perfiles de carreteras". Ramón Crespo del Río. Cuaderno AEPO N° 3. Madrid 1995. (En prensa).
- [3] "El IRI y el modelo de coche entero. Cálculo por el método de la ecuación de estado". Manuel Melis Maynar.

R.O.P. N° 3324. Madrid. Septiembre 1993.

- [4] "Criterios para la evaluación del estado de regularidad su-

“
La empresa concesionaria, a la vista de esta situación, decidió que la capa fina o espesor constante, prevista sobre la de regularización, se extendiera con una viga de 7 m acoplada a la extendidora. De esta forma se consiguió una regulación adicional que solucionó estos efectos marginales que afectan básicamente al tráfico de camiones.
”

perfiel de una calzada. Proyecto de regularizaciones.
Julio del Pozo Velasco. Ingeniería Civil N° 67 Madrid.

1. Existe también el efecto de la configuración de los ejes para vehículos de más de dos ejes
2. El lector no debe alarmarse. Se trata de valor de IRI puntual correspondiente a 10 cm

Julio del Pozo Velasco. Director del Dpto. de Programas y Métodos de Autopistas C.E.S.A., y Ramón Crespo del Río, Director del Dpto. de Auscultación de AEPO Ingenieros Consultores.

Suscríbase a la revista

“RUTAS”

la mejor revista para
técnicos y profesionales.

Boletín de suscripción
en pág. 95