

Experimento internacional para la armonización de medidas de regularidad superficial. Proyectos Even y Filter



Perfilómetros, momentos antes de comenzar el ensayo FILTER.

POR: MARTA ALONSO ANCHUELO, INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS Y FRANCISCO ACHÚTEGUI VIADA, DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS DEL CEDEX.

Introducción

La regularidad es un elemento importante en el análisis de las características superficiales de los firmes. Tiene una gran influencia sobre aspectos funcionales, tales como el consumo de combustible o el desgaste de los neumáticos y otras partes del vehículo, sobre todo las relacionadas con la suspensión. Por otra parte, afecta a la comodidad del usuario y provoca fatiga durante la conducción. También repercute en el medio ambiente, por los ruidos producidos con el paso de los vehículos, y

afecta a los firmes por los impactos dinámicos que aparecen como consecuencia de una regularidad superficial inadecuada.

Todos estos factores han provocado que el interés por una regularidad superficial adecuada crezca con el paso del tiempo, no sólo en el ámbito nacional, sino en el internacional. En este sentido, la regularidad es objeto de análisis en el Comité Técnico C1 de "Características Superficiales de los Firmes" de la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras).

Los equipos de medida de esta característica han sufrido una considerable evolución con el tiempo, desde los de referencia geométrica (tales como reglas fijas y rodantes) a los actuales perfilómetros láser de alta velocidad, pasando por equipos del tipo respuesta. Como consecuencia, los equipos utilizados en diferentes países para determinar la regu-

laridad son también distintos. Además, a pesar de existir un Índice de Regularidad Internacional (IRI), los indicadores utilizados internacionalmente varían considerablemente.

Como consecuencia, el Comité Técnico C1 de la AIPCR se planteó la necesidad de realizar un experimento internacional cuyo objetivo fuera armonizar los métodos de medida de los equipos de alta velocidad que se emplean actualmente y los indicadores de regularidad que proporcionan, en el ámbito mundial. El análisis de los resultados de este experimento serviría además como herramienta al grupo de trabajo CEN/TC227/WG5, encargado de establecer las especificaciones europeas sobre las características superficiales de los firmes.

El experimento, organizado por el Comité C1, se denominó EVEN y, como se explica más

adelante, se llevó a cabo en tres regiones: Arizona (EE.UU.), Ilokaido (Japón) y Países Bajos-Alemania. Esta última parte del experimento (la europea) fue organizada por el FEHRL (Foro Europeo de Laboratorios Nacionales de Investigación de Carreteras), que se ha encargado, además, del tratamiento y análisis de los datos obtenidos.

Pero el FEHRL se planteó no sólo organizar y tratar los resultados del experimento, sino realizar estudios teóricos sobre la regularidad superficial, inventariar los equipos europeos de medida de alto rendimiento, etc. Este proyecto se ha denominado Proyecto FILTER (*FEHRL Investigation of Longitudinal and Transverse Evenness of Roads*). En este artículo se describen las tareas y los métodos empleados para desarrollarlas.

Proyecto EVEN

En 1998, el Comité C1 de Características Superficiales de la AIPCR organizó un experimento internacional para armonizar las medidas de perfiles e indicadores de regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal.

El experimento fue llevado a cabo en tres regiones diferentes, con el objeto de establecer posibles diferencias en los métodos de medida en estas regiones y de optimizar los costes y la gestión de los trabajos por parte de la AIPCR.

Cada región organizó, financió y llevó a cabo su experimento, siempre teniendo en cuenta las directrices marcadas por el Comité C1.

En la figura 1 aparece un esquema de la organización del proyecto EVEN. Dentro de él, el Comité de Coordinación es el encargado de supervisar las conclusiones obtenidas por cada región y de extraer recomendaciones generales. Por otra parte, el Comi-

A pesar de existir un índice de Regularidad Internacional (IRI), los indicadores utilizados internacionalmente varían considerablemente

té Asesor se formó con miembros de las tres regiones donde se llevó a cabo el experimento.

Medidas de referencia

En los tres experimentos se tomaron medidas de referencia con los mismos equipos y los mismos operarios, para poder comparar los resultados obtenidos en las diferentes regiones. Estas medidas se tomaron bajo la vigilancia de expertos del Comité C1 en cada una de las regiones.

Con objeto de elegir cuáles serían los equipos de medida de referencia, se organizó un ensayo especial, en octubre de 1996, por la FHWA (*Federal Highway Administration*) norteamericana. Como resultado, teniendo en cuenta su comportamiento durante el ensayo y la facilidad y el coste de transporte, se seleccionaron 3 equipos: el Dipstick, el

Rolling Dipstick (ambos americanos) y el Walking Profiler (Australia). Todos ellos utilizan inclinómetros y son de tipo manual.

Para cada uno de los 3 experimentos se eligió el siguiente método:

En cada sección se tomaron datos topográficos cada 30 m utilizando mira y nivel. Posteriormente se pasaron los equipos de referencia. El Dipstick y el Walking Profiler toman datos del perfil de una forma discreta, (el primero cada 25 cm y el segundo cada 24,1 cm) mientras que el Rolling Dipstick toma los datos de una forma continua. Los resultados obtenidos con mira y nivel han servido para asegurar que no hay desviaciones entre ellos y los de los equipos de referencia.

Los perfiles obtenidos de esta forma han servido como "perfiles reales de referencia longitudinal y transversal" de cada tramo de ensayo, y se han utilizado para comparar los resultados obtenidos por el resto de los participantes en el experimento.

Experimento americano (Arizona)

El experimento se llevó a cabo en el Estado de Arizona (EE.UU.),

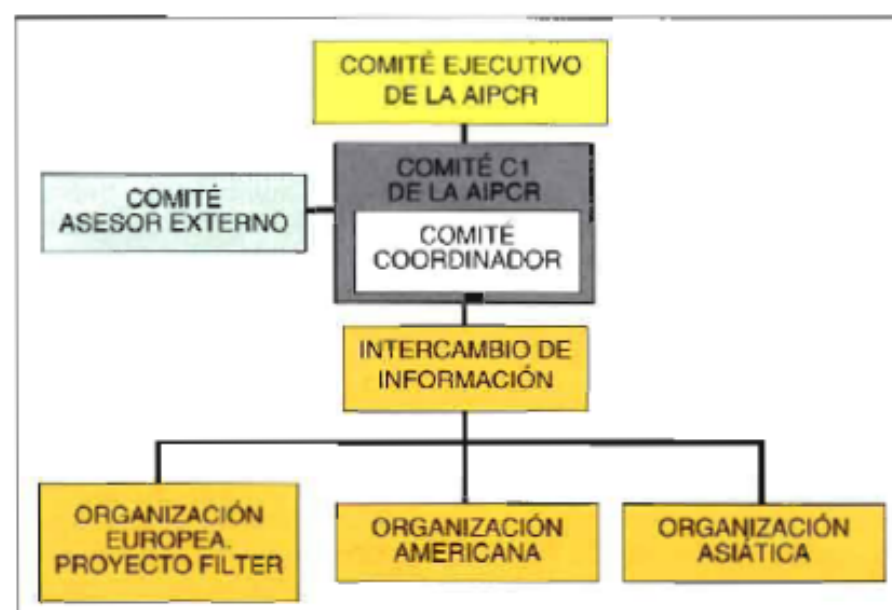


Figura 1. Organización del proyecto.



Equipos preparados para medir en un aeropuerto en el ensayo americano.

en el área localizada entre Phoenix y Tucson entre el 5 de abril y el 1 de mayo de 1998.

Los tramos de ensayo se localizaron en carreteras estatales, interestatales y locales, todas ellas en servicio. Además, se realizaron medidas en tramos especiales localizados en 3 aeropuertos. El número total de tramos fue de 20, y cubría un amplio espectro de condiciones de regularidad superficial, con valores del IRI que variaban entre 0,5 y 4,5 m/km.

Cada uno de los tramos de ensayo tenía una longitud de 330 m, que fue elegida siguiendo el borrador de las especificaciones ASTM sobre el "Método estándar para determinar la precisión y el sesgo de los equipos utilizados para medir perfiles longitudinales de la superficie de un firme" (septiembre de 1998).

El número total de participantes en el experimento fue de 6 equipos de alta velocidad, que debían realizar el ensayo a 60 km/h, 90 km/h y la velocidad mínima especificada por el fabricante. Se realizaron además medidas especiales en aceleración (desde la situación de vehículo completamente parado hasta conseguir 90 km/h) y deceleración

(desde 90 km/h hasta parar el vehículo).

Experimento asiático (Hokkaido)

Se realizó entre los días 6 y 17 de julio de 1998, con 8 participantes en total y en 15 zonas de ensayo. De ellas 12 correspondían a carreteras nacionales, 1 a carretera local y 2 a autopistas. Cada una de ellas tenía 1 km de longitud, siendo los primeros 300 m para la aceleración de los equipos, los 500 m siguientes para la toma de medidas y los 200 m res-

tantes para la deceleración. Los 500 m destinados al ensayo en cada sección se marcaron adecuadamente.

Los tramos ensayados cubren un estrecho rango de variación de regularidad superficial. El IRI mínimo medido fue de 2,4 m/km y el máximo de 5 m/km.

Las velocidades de ensayo variaron según las limitaciones de velocidad de las diferentes carreteras:

- Si la limitación era de 50 km/h, las medidas se tomaron a 30 y a 50 km/h.
- Si la limitación era de 60 km/h, las medidas se tomaron a 30 y a 60 km/h.
- Si la limitación era de 90 km/h, las medidas se tomaron a 60 y a 90 km/h.
- Si el tramo no estaba en servicio, las medidas se tomaron a 30, 60 y 90 km/h.

Una característica especial de este experimento es que las medidas a alta velocidad se realizaron durante la noche, debido a las regulaciones de tráfico existentes en el país. Las medidas a baja velocidad y los ensayos especiales con fluctuaciones de velocidad se realizaron durante el día. Los ensayos especiales tuvieron lugar en autopistas con acceso totalmente controlado.



Equipo midiendo durante la noche en el ensayo japonés.

Experimento europeo. Experimento FILTER (Países Bajos y Alemania)

El experimento europeo se realizó entre los días 15 y 25 de septiembre de 1998, y tuvo lugar en los Países Bajos y Alemania. En él participaron voluntariamente un total de 25 equipos de alta velocidad, que debían ser capaces de proporcionar perfiles. No obstante, se emplearon también equipos de baja velocidad, con el único objetivo de obtener los perfiles de referencia que se han utilizado en el análisis de los resultados proporcionados por los participantes.

Los tramos de ensayo, 12 en total, se escogieron de forma que se abarcara un amplio rango de regularidad superficial y estuvieran contruidos con diferentes materiales. Para ello, se siguieron los siguientes criterios:

- Para la regularidad longitudinal se tomarían:
 - Tres niveles de longitud de onda:
Baja (0,25 m - 2,5 m).
Media (2,5 m - 10 m).
Alta (>10 m).
 - Tres niveles de irregularidad (tomada basándose en el IRI):
Buena (<1,5).
Moderada (1,5 - 3,5).
Mediocre (>3,5).
- Para la regularidad transversal se tomarían:
 - Tres niveles de irregularidad (tomada basándose en la profundidad de rodadura):
Baja (<10 mm).
Media (10 mm - 20 mm).
Alta (>20 mm).
- Las secciones tendrían distintos tipos de firmes, incluyendo mezclas bituminosas, mezclas drenantes y hormigón.

Los participantes debían tomar medidas en todos los tramos fijados para el experimento, cuyas características y localización aparecen con más detalle en la tabla 1.

Las normas del experimento fijaron que, sobre cada tramo de ensayo, cada participante debía tomar medidas a 3 velocidades (60

Tabla 1. Características principales de los tramos de ensayo

Tramos en los Países Bajos	Long.	Material	IRI	Irregularidad transversal
O: Pista de ensayo de la DAF	400 m	Mezcla bituminosa	1,0	Alta
P: Pista de ensayo de la DAF	400 m	Hormigón	6,6	Baja
Q: Pista de ensayo de la DAF	400 m	Mezcla bituminosa	3,7	Baja
R: Pista de ensayo de la DAF	400 m	Hormigón	5,9	Baja
S: Pista de ensayo de la DAF	400 m	Hormigón	4,7	Baja
T: Carretera A67	500 m	Mezcla bituminosa	1,2	Media
U: Carretera A67	500 m	Mezcla drenante	0,8	Media
Tramos en Alemania	Long.	Material	IRI	Irregularidad transversal
V: Carretera E34	500 m	Mezcla bituminosa	1,7	Baja
W: Carretera E34	500 m	Hormigón	1,2	Alta
X: Carretera E34	500 m	Mezcla bituminosa	1,5	Alta
Y: Carretera E34	500 m	Hormigón	0,9	Baja
Z: Carretera E34	500 m	Mezcla bituminosa	2,1	Baja

km/h, 90 km/h y velocidad óptima de cada equipo) y se debían realizar 3 pasadas para cada una de las velocidades.

Además de estas normas de carácter general, se tomaron algunas medidas a baja velocidad (5 - 25 km/h), en aceleración - deceleración (50 - 70 - 50 km/h) y mediciones en curva de radio de 200 m a velocidad óptima. Todas estas medidas se tomaron únicamente en los tramos correspondientes a la pista de ensayo de la DAF (Países Bajos) y eran de carácter voluntario: no estaban incluidas con carácter de obligatoriedad en las normas del experimento.

Además de estas normas de carácter general, se tomaron algunas medidas a baja velocidad (5 - 25 km/h), en aceleración - deceleración (50 - 70 - 50 km/h) y mediciones en curva de radio de 200 m a velocidad óptima. Todas estas medidas se tomaron únicamente en los tramos correspondientes a la pista de ensayo de la DAF (Países Bajos) y eran de carácter voluntario: no estaban incluidas con carácter de obligatoriedad en las normas del experimento.

Proyecto FILTER

En el Proyecto, desarrollado por el FEHRL, han participado los siguientes laboratorios:

- BAST - Bundesanstalt für Strassenwesen (Alemania).
- CRR - Centre de Recherches Routières (Bélgica).



Perfilómetros de alta velocidad midiendo en carretera, perfectamente integrados en la corriente del tráfico.

- CEDEX - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (España).
- DRI - Danish Road Institute (Dinamarca).
- DWW - Dienst Weg- en Waterbouwkunde (Países Bajos).
- LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Francia).
- TRL - Transport Research Laboratory (Reino Unido).
- VTI - Vag-och Transport Forskings Institutet (Suecia).
- ZAG - Zavod Za Gradbenistvo (Eslovenia).

Este Proyecto pretende servir de herramienta de ayuda a la armonización de las medidas e indicadores de la regularidad, tanto longitudinal como transversal, utilizados en Europa. Para ello, se marcaron los siguientes objetivos:

- Inventariar y conocer los equipos de medida de regularidad longitudinal y transversal utilizados en Europa, a partir de sus datos técnicos y los métodos empleados para procesar la información.
- A partir de los datos del inventario, analizar la posibilidad de establecer unas especificaciones generales para los métodos de medida y el procesamiento de los datos.
- Organizar un experimento para analizar el comportamiento real de los equipos y determinar su repetibilidad, reproducibilidad y precisión. Este experimento es al que ya se ha hecho referencia en el artículo como la parte europea del proyecto EVEN.
- Determinar las posibles relaciones entre los indicadores de regularidad utilizados en diferentes países europeos con vistas a una posible armonización.
- Desarrollar análisis teóricos sobre los diferentes indicadores y los métodos de procesamiento de datos.
- Determinar qué errores y en qué medida influyen en los índices de regularidad propor-

Tabla 2. Listado de tareas y laboratorios encargados de desarrollarlas

Tareas	Coordinador	Cooperadores
0 Dirección científica.	CRR	DRI
1 Inventario de equipos de medida.	CRR	
2 Comparación de los métodos de medida.	CRR	TRL, DRI
3 Comparación de los métodos de proceso de datos.	TRL	LCPC, ZAG
4 Correlaciones entre índices.	LCPC	CEDEX
5 Influencia de los errores de medida en los índices	VTI	TRL
6 Organización y realización del experimento.	DWW, BAST	LCPC, VTI
7 Análisis de los resultados del experimento.	LCPC	CEDEX, TRL, VTI, ZAG

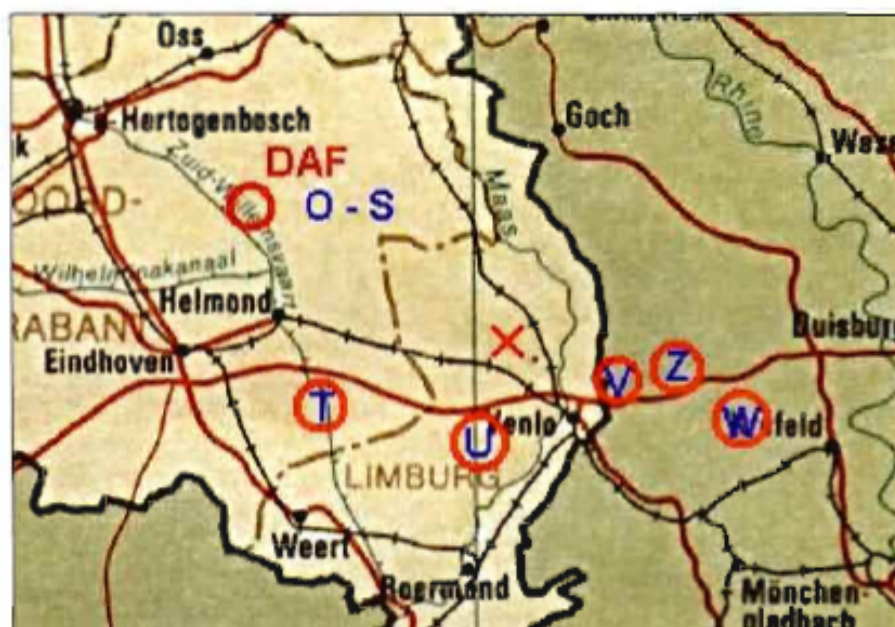
cionados por los equipos, con el objeto de obtener una precisión adecuada.

Para alcanzar estos objetivos se marcaron 7 tareas que se enumeran en la tabla 2 junto con los laboratorios encargados de desarrollarlas.

Inventario de equipos de medida

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto, era necesario determinar, en primer lugar, qué equipos son los que se utilizan para medir la regularidad super-

ficial de los firmes y cuáles son sus características principales. Por ello, la primera tarea consistió en crear un inventario con los equipos de medida de alta velocidad de regu-



Localización de los tramos de ensayo del experimento FILTER, en el sur de los Países Bajos - Alemania.



Vehículo belga con dos equipos de medida, longitudinal y transversal, durante el ensayo en la pista de la DAF.

laridad longitudinal y transversal utilizados en Europa. Este documento fue publicado en enero de 1999 por el FEHRL.

Para obtener estos datos, en 1998 se envió un cuestionario a 120 direcciones distribuidas en 25 países europeos, incluida Rusia. De todos ellos, contestaron un total de 16 países, que proporcionaron datos de 30 equipos de medida longitudinal y 25 de medida transversal. En varios casos, los equipos utilizados por diferentes países son los mismos. Por ello, realmente se consiguió información de 18 equipos diferentes de medida de regularidad longitudinal y de 17 equipos diferentes de medida de regularidad transversal. Se debe tener en cuenta que, en varios casos, un mismo equipo proporciona tanto medidas longitudinales como medidas transversales.

En el inventario se recogen separadamente los datos de los equipos para las medidas longitudinales y transversales. La información en ambos casos se incluye de la siguiente forma:

- Nombre del equipo.
- Datos de referencia, tanto de la persona que respondió el cuestionario como del fabricante.
- Datos técnicos relativos a la toma de datos, tales como el principio de medida, veloci-

dad del equipo, resolución, frecuencia, etc.

- Información sobre el método para el procesamiento de los datos.
- Información sobre los ficheros de salida.

La encuesta se envió antes de la realización del experimento FILTER. Como consecuencia, el número de equipos inventariado es mayor que el de los equipos que participaron en el experimento, aunque todos ellos, excepto uno (el equipo de Polonia), están incluidos en el inventario.

Comparación de los métodos de medida

Este estudio se corresponde con la tarea nº 2 fijada en el Proyecto FILTER. Para su desarrollo se ha partido de la información contenida en el inventario. A partir de ella se ha podido comparar las diferentes características de los equipos y sus métodos de medida.

Como ejemplo, en este artículo se incluye únicamente la tabla 3 con el rango de los valores en que se mueven los equipos que aparecen en el inventario, en lo que se refiere a algunas características básicas de medida.

Al analizar los datos proporcionados en las encuestas, se debe tener en cuenta que no siempre se pueden establecer compa-

raciones entre el comportamiento de los diferentes equipos. De cualquier forma, un análisis más detallado de cada uno de ellos podría permitir ciertas comparaciones.

Experimento FILTER

Los equipos participantes debían realizar sus medidas y proporcionar los resultados, tanto de perfiles como de índices, al FEHRL que ha sido el encargado de recopilarlos y analizarlos.

No obstante, las medidas tomadas en la autopista se hicieron en condiciones normales de tráfico (este era uno de los objetivos del experimento), lo que podría traer como consecuencia algunos problemas con la precisión de los perfiles obtenidos. Por ello, se decidió que, de estos datos, sólo se estudiarían los índices, mientras que, de los resultados obtenidos en los tramos de la pista de ensayo de la DAF, se estudiarían los perfiles y los índices.

La recolección de los datos proporcionados por los participantes finalizó el 29 de enero de 1999. El número de ficheros y el tipo de datos proporcionados por los participantes aparecen en la tabla 4:

Las medidas de referencia se tomaron con los equipos que aparecen en la tabla 5.

Por razones prácticas, las medidas de referencia tuvieron que realizarse a lo largo de 3 semanas. Los equipos seleccionados como de referencia para el experimento FILTER fueron los proporcionados por el VTI (Suecia), debido a que midieron en todos los tramos de ensayo.

Las medidas tomadas con el Rolling Dipstick fueron seleccionadas para establecer comparaciones con los ensayos americano y asiático, aunque únicamente se utilizaron en la pista de ensayo de la DAF.

Los resultados obtenidos a partir del Walking Profiler, se utilizaron para chequear posibles dispersiones con las medidas dadas

por los otros. Este equipo tomó datos únicamente en la pista de ensayo de la DAF.

Análisis de los datos del experimento

Este análisis comenzó una vez que se hubo realizado la recolección de los resultados. El análisis de los perfiles y de los índices, tanto longitudinales como transversales, se ha repetido dos veces. La primera, utilizando la base de datos original (una vez eliminados los valores erróneos debidos al proceso informático o a errores en la toma de los datos durante el experimento) para obtener los resultados derivados de los datos tal como los proporcionaron los participantes. La segunda, tras un análisis realizado aplicando la Norma ISO 5725, que sirvió para descartar los valores aberrantes. En este caso, los valores aberrantes detectados se eliminaron de la base de datos y se repitió el proceso.

En los apartados siguientes se describe brevemente el método seguido para analizar cada uno de estos datos.

Perfiles longitudinales

El primer paso consistió en comparar los datos del PRIMAL, del Walking Profiler y del Rolling Dipstick, observándose que las correlaciones entre ellos eran buenas. A partir de ese momento, se tomaron como referencia los perfiles longitudinales obtenidos por el PRIMAL.

A continuación, se siguió el siguiente esquema:

- Se filtraron los perfiles para eliminar datos relativos a longitudes de onda no incluidas entre 0,78125 m y 50 m, con el objeto de ajustarse a los intervalos de longitud de onda que corresponden a la regularidad superficial, como aparece en los dos primeros gráficos de la figura 2.
- Como normalmente el intervalo de muestreo de los equipos es diferente entre sí y con respecto al de referencia, se

Tabla 3. Rango de valores de variación de los equipos contenidos en el inventario

CARACTERÍSTICAS	MÍNIMO	MÁXIMO
Regularidad longitudinal		
Velocidad máxima (km/h)	60	130
Intervalo de medida (mm)	1	500
Resolución vertical (mm)	0,01	2
Anchura de banda:		
baja longitud de onda (m)	0,01	3
Anchura de banda:		
alta longitud de onda (m)	20	150
Regularidad transversal		
Velocidad máxima (km/h)	35	144
Intervalo máximo (m)	1,9	4,0
Número de sensores	3	37 o más ¹⁾
Resolución vertical (mm)	0,01	1
Intervalo de repetición (m) ²⁾	0,025	10

1. Para medidas continuas.
2. Intervalo en la dirección de avance del vehículo, entre dos perfiles transversales sucesivos.

Tabla 4. Datos proporcionados por los participantes

Equipo	Perfil long.	Índice long.	Perfil transv.	Índice transv.
A 1	X			
A 2	X	X		
A 3			X	X
B 6	X	X	X	X
B 7	X	X	X	X
B 9	X	X	X	X
B 10	X	X	X	X
C 11	X	X	X	X
C 12	X	X	X	X
C 13	X	X	X	X
C 15	X	X	X	X
D 16	X	X		
D 17	X	X	X	X
D 18	X	X	X	X
D 19	X	X		
E 21			X	X
E 22	X	X		
E 23	X	X	X	X
E 24				X
F 26			X	X
F 27	X	X	X	X
F 29	X	X		
F 30	X	X	X	X
G 32	X	X		
G 33	X	X		
Nº Ficheros	2 194	37 699	1 681	34 222

Tabla 5. Equipos de referencia

Equipo	Regularidad longitudinal	Regularidad transversal
Mira y nivel	X	
PRIMAL *	X	
Cross Profilometer *		X
Walking Profiler	X	X
Rolling Dipstick	X	

(*) Equipos de referencia del experimento FILTER.



Equipo australiano de referencia Walking Profiler.

replantearon los perfiles de cada equipo (previamente filtrados) ajustando el intervalo de muestreo al del PRIMAL (4,5 cm), tal como aparece en el último gráfico de la figura 2.

- Se filtraron de nuevo los perfiles (ya con un intervalo de muestreo de 4,5 cm) y se dividieron en 3, en función de las siguientes bandas de onda:
 - Longitudes de onda corta: 0,78125 m - 3,125 m
 - Longitudes de onda media: 3,125 m - 12,5 m
 - Longitudes de onda larga: 12,5 m - 50,0 m
- Una vez que los perfiles longitudinales proporcionados por los participantes tenían todos el mismo intervalo de muestreo y habían sido divididos en tres bandas según su longitud de onda, el resto del análisis ha consistido en determinar:
 - La precisión de los perfiles longitudinales proporcionados por cada participante, con relación a los perfiles de referencia.
 - La repetibilidad de los perfiles proporcionados por cada participante.

Estas tareas se describen a continuación:

Precisión de los perfiles longitudinales de cada participante respecto a los de referencia

Aunque en el experimento se marcaron el principio y el final de los tramos de ensayo, es inevitable que se produzca algún error por parte de los participantes en el momento de comenzar y finalizar la medida.

Para solventar este problema, se colocaron superpuestos cada perfil longitudinal y el de referencia. Este último permanecía fijo, mientras que el del participante se desplazaba ligeramente en horizontal con un intervalo constante. Para cada posición se calculó la suma de los cuadrados de las diferencias de altura del perfil con respecto al de referencia. Finalmente, se eligió la posición que proporcionaba menor

Comparando los datos del PRIMAL, del Walking Profiler y del Rolling Dipstick, se ve que las correlaciones son buenas

valor de la suma de los cuadrados.

Una vez que los dos perfiles se alinearon, los parámetros utilizados, para comparar la precisión de los datos han sido (figura 3):

- Los resultados de la función de transferencia de cada equipo y la del de referencia. Se ha utilizado la norma ISO 8608 "Vibraciones mecánicas, perfiles superficiales de carreteras y presentación de los resultados de las mediciones".
- La suma de los cuadrados de las diferencias de altura del perfil proporcionado por el participante con respecto al de referencia.
- El histograma acumulado de la suma de los cuadrados de las diferencias de altura.

Repetibilidad de los perfiles proporcionados por cada participante

Debido a que para cada perfil existían como máximo tres pasadas, utilizar técnicas estadísticas como medias y desviaciones típicas no parecía suficientemente fiable. Por ello, el método de análisis se ha basado en los resultados obtenidos como diferencias de energía (expresado en porcentaje de la diferencia) y de los obtenidos en los histogramas (expresado como la máxima diferencia en valor absoluto) en las diferentes pasadas.

Índices longitudinales

Los participantes en el experimento FILTER proporcionaron un total de 29 índices longitudinales, de los que algunos de ellos tienen la misma definición pero afectan a diferentes longitudes de onda. Por tanto, realmente se han obtenido resultados de 15 tipos diferentes de índices. En la tabla 6 aparecen sus definiciones:

Cada participante debía proporcionar los resultados de sus índices longitudinales medidos en cada sección, a tres velocidades distintas y dando tres pasadas. Pero, además, debían procesar los datos para calcular los índices, en

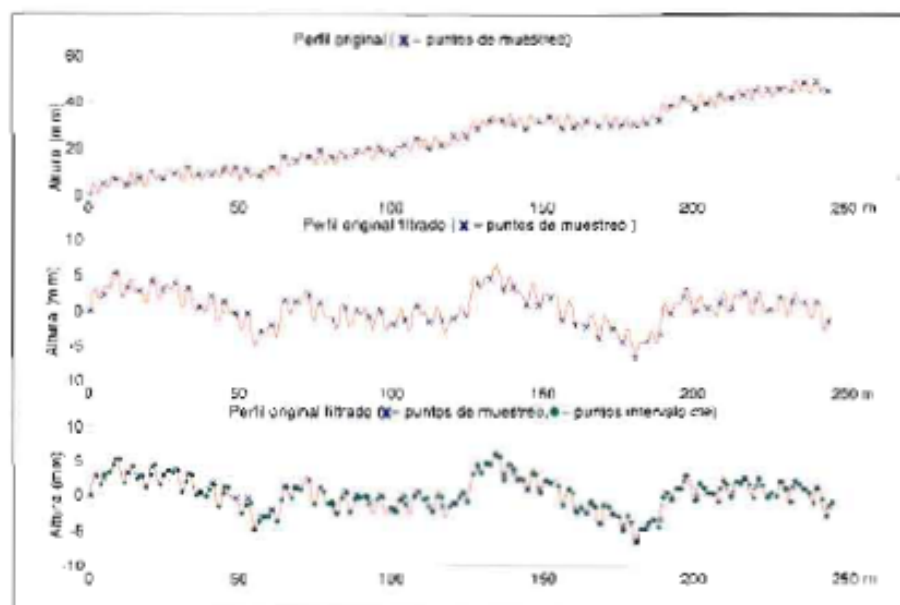


Figura 2. Esquema de los primeros pasos del análisis.

cada una de las secciones, cada 50, 100, 200, 300, 400 y 500 m. Como consecuencia, se recogieron más de 35 000 ficheros que contenían 107 527 resultados después de eliminar los erróneos.

Los pasos seguidos para el analizar todos estos resultados han sido:

- Comparación entre los datos proporcionados por cada participante (en cada índice, velocidad e intervalo de resultados) y la media de todos los participantes.
- Análisis de la influencia de la velocidad en los datos.
- Correlaciones entre índices.
- Análisis de la repetibilidad y reproducibilidad de los índices.

A continuación, se describe el método seguido en cada caso.

Comparación entre los datos proporcionados por cada participante y la media de todos los participantes

- Aunque cada participante debía proporcionar los índices correspondientes a 3 pasadas, algunos de ellos hicieron menos. Por tanto, el primer paso en el análisis de los índices longitudinales fue calcular las medias (Mp) de los datos de las diferentes pasadas para

cada participante, cada índice, velocidad e intervalo de resultados.

- El siguiente paso consistió en calcular la media (Mt) de los datos proporcionados por **todos los participantes** que calcularon el mismo índice, para cada sección, intervalo de resultados y velocidad.
- Para determinar si las medidas de los participantes se ajustaban a la media, se calcularon las regresiones lineales entre los datos (Mp) de cada equipo y la media (Mt). Se han obtenido en cada caso,

la ecuación de la regresión, el coeficiente de determinación R^2 y la desviación estándar. En la figura 4 aparece un ejemplo de las correlaciones.

Los resultados obtenidos indican una coincidencia apreciable entre los datos de los diferentes equipos, lo que ha permitido que el cálculo de las correlaciones entre índices se haya hecho utilizando las medias de los datos de los equipos. Como consecuencia, el número de datos que se debían tratar (ya de por sí muy elevado con el método seguido) disminuyó sin introducir un error elevado, salvo en alguna excepción, en los cálculos de las correlaciones.

Análisis de la influencia de la velocidad en los datos

El siguiente paso consistió en determinar la influencia de la velocidad en los resultados obtenidos por los participantes. Para realizarlo, se han utilizado las medias (Mt) calculadas previamente para cada una de las tres velocidades. Posteriormente se obtuvieron las correlaciones entre los datos correspondientes a la velocidad óptima y los obtenidos a cada una de las otras dos velocidades. En todos los casos se han determinado las ecuaciones de las

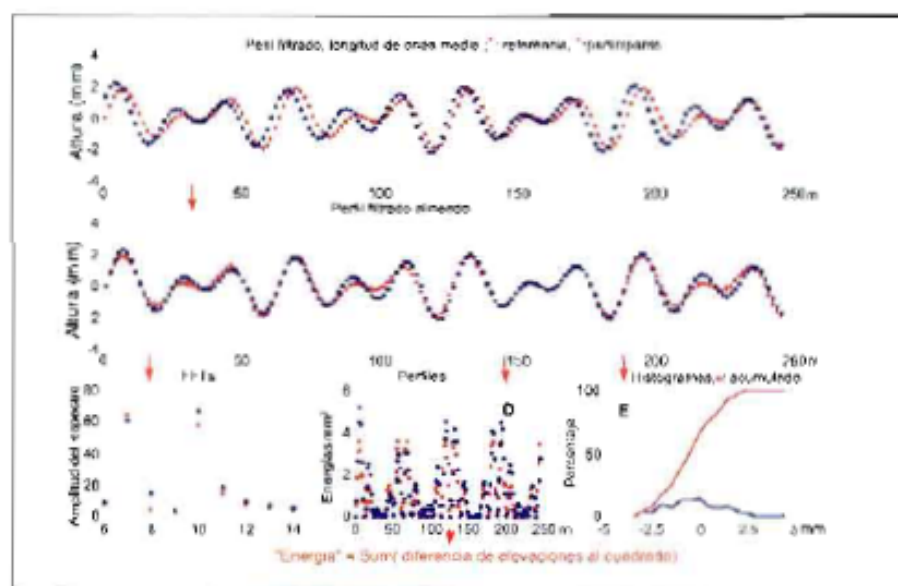


Figura 3. Resultados del análisis

Tabla 6. Índices longitudinales

INDICE
IRI (Índice de Regularidad Internacional)
Varianza de 3 m como se utiliza en el Reino Unido.
Varianza de 10 m como se utiliza en el Reino Unido.
Varianza de 30 m como se utiliza en el Reino Unido.
G (m) y w como se define en la norma ISO 8608
Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 2,5 como se utiliza en Bélgica.
Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 10 como se utiliza en Bélgica.
Coefficiente CP (Coefficient de Planéité) 40 como se utiliza en Bélgica.
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda cortas.
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda medias.
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda largas.
Regla de 5 m
RN (Ride Number)
AUN como se utiliza en Alemania
Desviación estándar de 3 m, media móvil.
Desviación estándar de 10 m, media móvil.
Desviación estándar de 30 m, media móvil.
Altura de irregularidad periódica
Energía de longitud de onda corta como se utiliza en Francia.
Energía de longitud de onda media como se utiliza en Francia.
Energía de longitud de onda larga como se utiliza en Francia.
Desviación de la regla de 3 m como se utiliza en Rusia
RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 0,5 - 2,5 m.
RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 2,5 - 10 m.
RMS (Root Mean Square) para bandas de onda de 10 - 50 m.
Varianza de la pendiente
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda cortas como se utiliza en Francia.
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda medias como se utiliza en Francia.
NBO (Note de Bande d'Onde) para longitudes de onda largas como se utiliza en Francia.

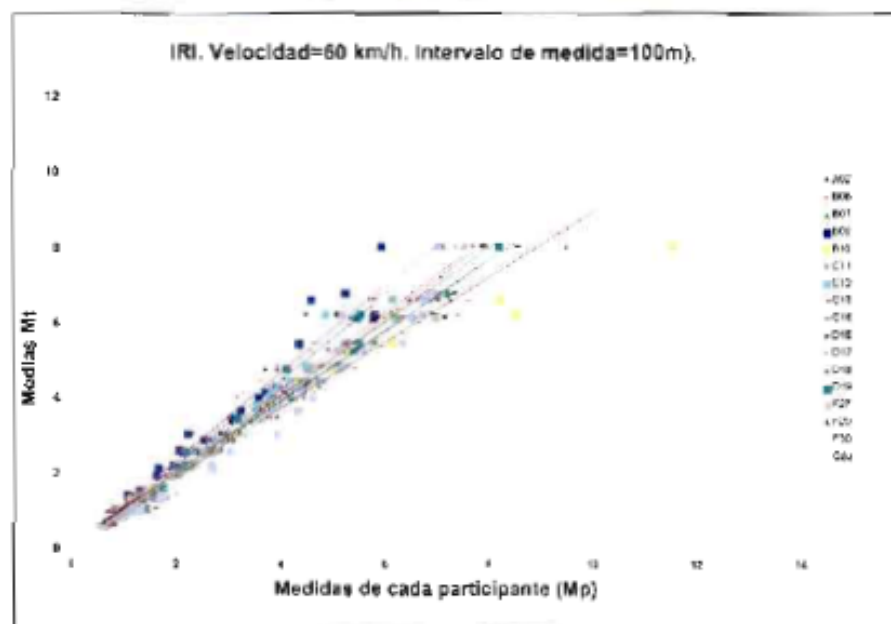


Figura 4. Correlaciones entre los datos de cada equipo y la media.

correlaciones, los valores de R^2 y las desviaciones estándar.

En la figura 5 aparece un ejemplo de estas correlaciones.

El resultado de este análisis fue que, en general, la velocidad del equipo no ha influido en los datos obtenidos en el experimento.

Correlaciones entre índices

Como la velocidad no influyó en los resultados de los participantes, se decidió realizar las correlaciones entre índices diferentes, utilizando las medias de los datos correspondientes a las tres velocidades, para cada índice e intervalo de medida.

Cada pareja de índices tiene una correlación para cada intervalo de medida. Por lo tanto, para cada par de índices hay 6 correlaciones como máximo (correspondientes a los intervalos de 50, 100, 200, 300, 400 y 500 m).

De todas y cada una de las correlaciones se obtuvieron las ecuaciones, el coeficiente de determinación R^2 , las desviaciones estándar y un test estadístico para determinar la aleatoriedad secuencial de los valores (test de las rachas). Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se eligió el mejor tipo de correlación (lineal, potencial, exponencial o logarítmica) y se llegó a la siguiente clasificación:

- Correlaciones lineales, potenciales, exponenciales o logarítmicas
- Correlaciones lineales, potenciales, exponenciales o logarítmicas con posibles valores erróneos
- Correlaciones lineales, potenciales, exponenciales o logarítmicas dudosas
- Sin correlación.

Reperibilidad y reproducibilidad de los índices longitudinales

Para realizar este estudio se ha utilizado la Norma ISO 5725, equivalente a la Norma UNE 82009 "Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición".

Perfiles transversales

El análisis de los perfiles transversales, después de detectar valores erróneos en los ficheros originales y depurarlos, ha seguido el siguiente esquema:

- Como la posición de los perfiles transversales a lo largo de los tramos de ensayo variaba entre los participantes y con respecto al perfil de referencia, se seleccionaron los perfiles que fueran más cercanos a los de referencia, con un intervalo máximo de separación de 1m.
- Al tenerse en cuenta que la posición transversal de los equipos al tomar la medida podía variar ligeramente entre ellos y con respecto al perfil de referencia, se calcularon las líneas de regresión de cada perfil (incluyendo el de referencia), y se hizo un cambio de ejes a partir de las diferencias de las ordenadas del perfil con respecto a la línea de regresión. Se colocaron superpuestos cada perfil del participante con su perfil de referencia, tomando como fijo el de referencia y moviendo el del participante en horizontal un incremento constante. Para cada posición se calculó la media de los valores absolutos obtenidos como diferencia entre las ordenadas del perfil del participante y el de referencia.
- Se buscó la posición en que la media de los valores absolutos de las diferencias era menor y se compararon los perfiles calculando la desviación estándar de las diferencias de altura entre el perfil del participante y el de referencia.

Índices transversales

- Los participantes en el experimento proporcionaron un total de 10 índices transversales que aparecen en la tabla 8, y que se podrían clasificar como índices que de-

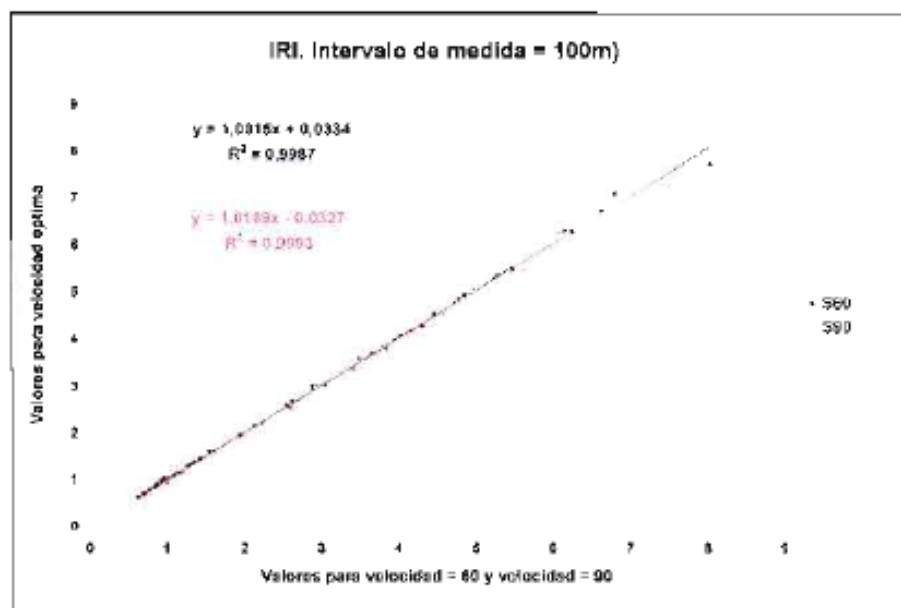


Figura 5. Correlaciones entre datos a distintas velocidades.

penden de la pendiente, índices que dependen de la profundidad de la rodera e índices que dependen del charco de agua que se puede formar en las roderas.

En este caso, los índices transversales han sido analizados para determinar:

- La influencia de la velocidad en los datos. El método empleado ha sido el mismo que para los índices longitudinales y el resultado también coincide en que la velocidad no ha influido en los datos proporcionados por los participantes.
- La repetibilidad y la reproducibilidad de los índices. Al igual que para los índices longitudinales se ha seguido la Norma ISO 5725.

En general, la velocidad del equipo no ha influido en los datos obtenidos en el experimento

Análisis teórico

Además de la organización y análisis de los datos del experimento, que, por la cantidad de datos, ha ocupado gran parte del proyecto, se han realizado estudios teóricos, que han sido:

- Influencia de las diferentes longitudes de onda en los índices longitudinales. Para ello se partió de los algoritmos de los diferentes índices (aunque no ha sido posible obtener los de algunos) y, a partir de esta información se determinaron algunos elementos comunes para índices diferentes, así como las longitudes de onda a que son más sensibles.
- Influencia de los errores en los índices longitudinales. En este estudio se ha tenido en cuenta que los perfiles que obtienen los equipos son procesados por ellos mismos para obtener los que proporcionan a los usuarios. Para determinar la influencia de este proceso en los índices longitudinales obtenidos, se crearon perfiles artificiales y se obtuvieron los índices utilizando sus algoritmos. Posteriormente, los perfiles artificiales se procesaron variando los intervalos de muestreo y la lon-

Tabla 8. Índices transversales

ÍNDICES
Pendiente transversal
Máxima profundidad de rodera
Profundidad de la rodera derecha
Profundidad de la rodera izquierda
Máxima profundidad de la rodera más dos veces la desviación típica
Desviación típica de la profundidad máxima de la rodera
Máxima profundidad de agua en la rodera
Profundidad de agua en la rodera derecha
Profundidad de agua en la rodera izquierda
Área de agua en la derecha

gitud sobre las que se calculaban las medias. Una vez obtenidos los perfiles procesados, se utilizaron de nuevo los algoritmos para obtener los "índices procesados" y se compararon con los obtenidos a partir de los perfiles artificiales.

Además, se ha analizado la influencia del ruido en los índices. Para ello, se procesaron los perfiles artificiales añadiendo un ruido aleatorio en distintas posiciones. Para cada posición se varió el nivel de ruido según una función gaussiana. Posteriormente se calcularon los índices y se compararon.

- Influencia de los errores en los índices transversales. En la medida de los índices transversales influyen una serie de errores que pueden estar provocados por variaciones en la posición lateral del vehículo y errores provoca-

dos por los intervalos de muestreo o por la propia longitud total del perfil transversal.

Para determinar cómo afectan estos errores en los índices de regularidad transversal se ha realizado un ejercicio de simulación utilizando 7 perfiles de carreteras localizadas en Suecia. Estos perfiles se han tomado de forma que representaran una muestra fiable de los distintos problemas de regularidad transversal que se pueden encontrar en carre-



Detalles de la barra del perfilómetro láser de medida de regularidad transversal.

**Los resultados
obtenidos indican
una coincidencia
apreciable entre
los datos
de los diferentes
equipos**

teras en servicio. El ensayo ha consistido en simular los datos obtenidos por 5 vehículos variando el intervalo de muestreo, la longitud total del perfil que proporcionan y la situación lateral del vehículo con respecto al carril. Posteriormente se calcularon los índices y se analizó la influencia de cada uno de estos factores.

Consideraciones finales

A lo largo de este artículo se han descrito dos proyectos de investigación internacional sobre regularidad superficial de los firmes (EVEN y FILTER). Esta es una característica que cada vez se tiene más en cuenta en los diferentes países para mantener las carreteras en condiciones de comodidad para el usuario.

La necesidad de alcanzar la armonización de los métodos de medida de regularidad es una consecuencia de la proliferación de equipos de alta velocidad en los diferentes países, e incluso dentro de un mismo país. Esta situación, puede provocar, en ocasiones, dudas acerca de la homogeneidad de los resultados obtenidos por diferentes equipos.

Teniendo esto en cuenta, el Proyecto EVEN trata de conseguir una herramienta para alcanzar una armonización a nivel mundial, aunque, de momento, se basa únicamente en los resultados de los experimentos cuyos resultados están pendientes de publicación. Sin embargo, el Proyecto FILTER, además de utilizar los resultados del experimento, ha abarcado estudios teóricos que pueden ampliarse en un futuro.

Las tareas y objetivos del Proyecto FILTER podrían calificarse como ambiciosos y, como consecuencia del número de datos y de los desarrollos y análisis teóricos, se ha obtenido un número considerable de resultados de los que ya se han extraído algunas con-

clusiones que serán publicadas por el FEHRL en varios informes. No obstante, las bases de datos permitirán, en un futuro próximo, seguir extrayendo conclusiones y realizar análisis sobre diferentes aspectos no tratados aún en esta fase del proyecto.

Reconocimientos

Se agradece su colaboración a todos los miembros del FEHRL que, además de los autores, han participado en el desarrollo y ejecución del Proyecto: Eckhard Kempkes (BASt), Guy Descornet (BRR), Sixto Yanguas (CEDEX), Bjarne Schmidt (DRI), Bert De Witt (DWW), Daniel Marc Ducros (LCPC), Brian Ferne y Martin Willet (TRL), George Magnusson y Leif Sjörgren (VTI), Bojan Leben y Ljubo Petkovic (ZAG).

Bibliografía

FEI IRL, **Inventory of High-Speed Longitudinal and Transverse Road Evenness Measuring Equipment in Europe**. Nota Técnica 1999/01

Schmidt Bjarne, Wambold Jim, Kawamura Akira, Descornet Guy, **PIARC International Experiment to Harmonise Longitudinal and Transverse Profile Measurements and Reporting Procedures**. XXI Congreso Mundial de la AIPCR, Kuala Lumpur (Malasia), octubre 1999.

El Proyecto FILTER, además de utilizar los resultados del experimento, ha abarcado estudios teóricos que pueden ampliarse en un futuro

Alonso Anchuelo Marta, Yanguas González Sixto, Achútegui Viada Francisco, **Proyecto FILTER Sobre Comparación y Armonización de los Métodos de Medida de la Regularidad Superficial de los Firmes**. 10º Congreso Ibero-Lationoamericano del Asfalto, Sevilla (España), noviembre 1999.

Schmidt Bjarne, **EVEN, PIARC International Experiment to Compare and Harmonize Methods for the Assessment of Longitudinal and Transverse Evenness of Pavements**. SURF 200 (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), Nantes (Francia), mayo 2000.

De Witt L-B., Kempkes E., Sjörgren L., Ducros D.M., **FILTER Experiment. Organisation and Carrying-out a Comparison Experiment of High-Speed Longitudinal and Transverse Road Evenness Measuring Equipment Used in Europe**. SURF 200, Concluding Workshop (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), Nantes (Francia), mayo 2000.

Alonso M., Ducros D.M., Petkovic L., **FILTER Experiment: Analyses of the Longitudinal Profiles and Indices**. SURF 200, Concluding Workshop (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), Nantes (Francia), mayo 2000.

Descornet G, Berlemont B, Martin J.M., **FILTER Experiment: Analysis of Transverse Profiles and Indices**. SURF 200, Concluding Workshop (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), Nantes (Francia), mayo 2000.

Willet M, Magnusson G, Ferne B, **Theoretical Study of Indices**. SURF 200, Concluding Workshop (IV Simposio Internacional de Características Superficiales de la AIPCR), Nantes (Francia), mayo 2000. ■