

MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL. EL INDICADOR IRI Y EL EQUIPO DIPSTICK

RAMON CRESPO DEL RIO (*)
SANTIAGO POUSALLAN (**)

RESUMEN. La regularidad superficial es la característica mejor percibida por los usuarios de las carreteras. A la vez la medida de la regularidad superficial de pavimentos y su interpretación ingenieril son importantes para valorar la calidad de construcción del firme y el nivel de servicio de un tramo o red de carreteras. En las páginas siguientes se aborda la exposición del significado del Índice de Regularidad Internacional (IRI), su obtención con el equipo DIPSTICK y las primeras aplicaciones a las carreteras españolas.

ABSTRACT. *The evenness of the road surface is the factor that road users notice more than any other. At the same time, the measurement of the evenness of the surface of the pavement and its interpretation by engineers, are important for the evaluation of the quality of the construction of the road surface and the service level that is provided by a stretch of road of the network. The following pages deal with the significance of the IRI, and how it is obtained with DIPSTICK equipment the first applications on spanish roads.*

1. ANTECEDENTES

Recientemente la Dirección General de Carreteras ha puesto en vigor (ORDEN CIRCULAR 308/89 CyE SOBRE RECEPCIÓN DEFINITIVA DE OBRAS) la valoración de la regularidad superficial de los pavimentos mediante la obtención del indicador denominado «ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL» (IRI). Se establece aceptable, para la recepción definitiva de obras (pavimentos de nueva construcción), el valor $IRI \leq 2$ dm/hm.

Asimismo el CEDEX ha adquirido el equipo de medida de la regularidad superficial, denominado DIPSTICK, que permite la adquisición de los datos del perfil longitudinal, necesarios para el cálculo del IRI, que se realiza mediante la aplicación informática complementaria suministrada con el equipo.

En las páginas siguientes se describen algunos aspectos relacionados con el IRI y su obtención con el DIPSTICK.

2. EL IRI (ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL)

2.1. ORIGEN Y JUSTIFICACIÓN DEL IRI

Uno de los problemas con los que se encuentran los técnicos y especialistas del estudio y análisis de la regu-

laridad superficial a la hora de valorar la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos y de comparar experiencias entre países, es la gran diversidad de técnicas, equipos e indicadores existentes en cada país.

Como consecuencia de ello se planteó a nivel internacional, el interés de desarrollar un índice único y común al que referirse, que fuera independiente del equipo o técnica de obtención de la geometría del perfil y que además representara significativamente el conjunto de las percepciones de los usuarios circulando en un vehículo medio a una velocidad media.

Estas necesidades dieron lugar a la celebración del experimento internacional denominado IRRE (International Road Roughness Experiment), uno de cuyos frutos fue el desarrollo del concepto, definición y método de cálculo del IRI.

El IRRE fue llevado a cabo en 1982 en Brasil, bajo la coordinación del Banco Mundial, con la colaboración de diversos países europeos (Francia, Gran Bretaña, Bélgica) y diversas agencias y centros de investigación de USA, entre los que destaca el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad de Michigan (UMTRI).

2.2- CONCEPTO DE IRI

El IRI (Índice de Regularidad Internacional) es un indicador estadístico de la regularidad superficial del pavimento de una carretera.

El IRI, al igual que otros indicadores, representa una forma de cuantificar la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $IRI=0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Sector de Tecnología y Estudios. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (IMOPU).

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Encargado de la Sección de Características Superficiales. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (IMOPU).

Es también una forma de valorar la comodidad de la rodadura sobre un pavimento. En este último aspecto representa el movimiento vertical que se produciría en el asiento del conductor de un vehículo normalizado (representado esquemáticamente por un modelo de cuarto de coche), circulando a velocidad constante y definida, durante la distancia recorrida. De ahí sus unidades ($\text{dm/hm} = \text{mm/m} = \text{m/km} = \text{pendiente} \times 1000$), por lo tanto, el concepto de IRI es asociable a una pendiente (desplazamiento vertical dividido por desplazamiento horizontal).

El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, definido por su IRI inicial > 0 , debido a condicionantes constructivos (maquinaria de extendido, número de capas del firme, calidad de la ejecución).

Una vez puesta en servicio, la geometría del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tráfico, evolucionando hacia valores más elevados del IRI (mayores irregularidades). La orden circular a la que se ha hecho referencia, fija el criterio español para el estado inicial deseable en las carreteras de nueva construcción. Queda por estudiar y fijar los valores umbrales de conservación, y los valores máximos previos a las intervenciones destinadas a regenerar la regularidad superficial a los niveles deseados.

El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea del perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida del perfil longitudinal.

Su principal ventaja reside en que el IRI es un modelo matemático, cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo con el que se haya obtenido el perfil.

Otra cuestión diferente e importante de considerar es la representatividad de las ordenadas que se introducen en el cálculo para obtener el IRI, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo del mismo.

Con ello se quiere significar la importancia de la precisión de la medida del perfil para valorar la regularidad superficial mediante el IRI. En este sentido la mejor forma de tener una representación muy fiable del perfil sería mediante nivelación de precisión con un muestreo del perfil muy intenso (por ejemplo ordenadas o cotas del perfil cada 10 cm y errores de lectura inferiores a 0,5 mm). Sin embargo este procedimiento es tremendamente lento, engorroso y caro —un tramo de 1 km requeriría la nivelación de 10.000 puntos y su tratamiento informático posterior—, por ello hay que recurrir al empleo de técnicas o equipos más rápidos y baratos, aun a costa de pérdida de precisión.

La fiabilidad y precisión de los equipos de medida de la regularidad superficial es una de las cuestiones más delicadas y complejas de decidir y valorar. A este respecto la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) ha establecido un sistema de clasificación de las técnicas y equipos de medida de la regularidad superficial según el máximo error en tanto por ciento y en unidades del IRI.

El sistema traducido y adaptado al contexto español (sólo se citan las técnicas o equipos de empleo en España), se presenta en la tabla 1.

CLASE	EQUIPO	ERROR MAXIMO	
		%	IRI
I	MIRA Y NIVEL DIPSTICK	1,5	0,3 m/km
II	APL < > ARS RST	5,0	0,7 m/km
III	RUGOSIMETRO BPR	10,0	0,5-1,0 m/km
IV	NO APLICABLES PARA DATOS RELACIONADOS CON SGF		

TABLA 1. Confiabilidad de equipos de regularidad superficial (según FHWA).

2.3. DEFINICION DEL IRI

La definición del IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; en base a ella un vehículo se puede modelizar, simplificada, por un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante muelles y amortiguadores.

El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas. Todo el sistema queda regido por la ecuación fundamental de NEWTON: Fuerza = Masa $\times$ Aceleración.

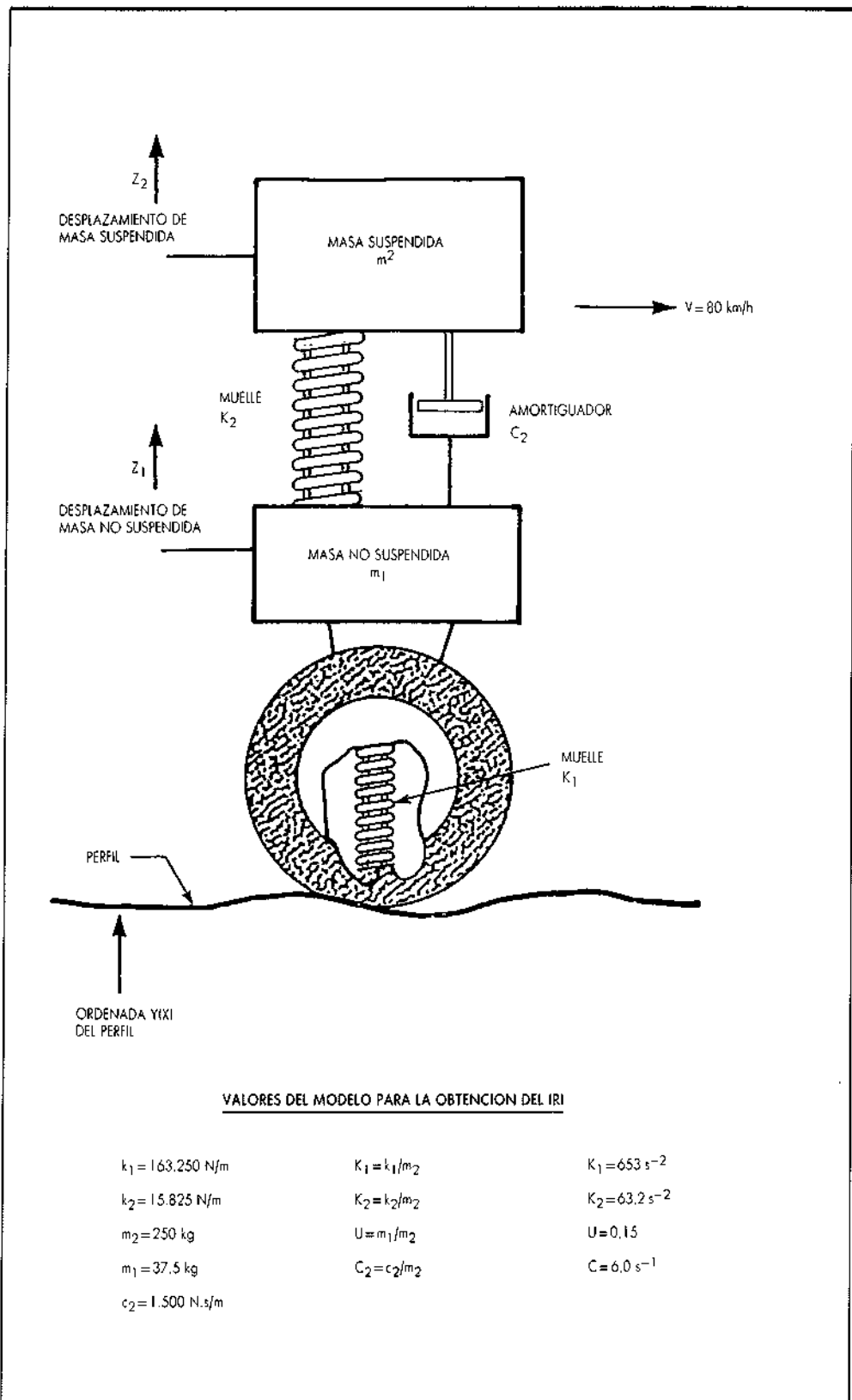
Asumida esta forma de simular el comportamiento de los vehículos sobre la carretera, el vehículo se simplifica, por simetría, como un CUARTO DE COCHE, y se modeliza por la magnitud de sus masas y constantes de muelle y de amortiguación.

La masa del cuarto de coche se divide en dos partes, la superior, soportada por el sistema de suspensión (MASA SUSPENDIDA) y la parte inferior, independiente de la suspensión (MASA NO SUSPENDIDA). La suspensión se esquematiza por un muelle (k_2) y por un amortiguador (c_2) y la parte no suspendida —prácticamente la rueda— se esquematiza, a su vez, por un muelle (k_1) que representa la deformabilidad o rigidez del neumático.

El esquema 1 adjunto permite visualizar el modelo de cuarto de coche, que sirve de base para la definición del IRI y otros muchos estudios relacionados con la dinámica de automóviles.

Si a los valores de los parámetros m_1 , m_2 , k_1 , k_2 , c_2 se les asignan los valores de la tabla que figura en el esquema 1, correspondientes al modelo denominado «GOLDEN QUARTER CAR», y se fija como velocidad de referencia 80 km/h, se tienen establecidas las bases para obtener el IRI. Cualquier modificación en los valores numéricos de los parámetros o de la velocidad de referencia desvirtuaría la definición del IRI.

Teniendo en cuenta lo anterior, el IRI en cada punto



ESQUEMA 1. Del modelo de cuarto de coche.

se define como el valor absoluto de la variable $|z'_2 - z'_1|$ de las mesas suspendida y no suspendida. A la variable $|z'_2 - z'_1|$ se le denomina «pendiente rectificada de perfil filtrado», porque en definitiva es la pendiente de un perfil —distinto, pero derivado del perfil de la carretera—, filtrado por las características del modelo de cuarto de coche «GOLDEN QUARTER CAR».

Si además se tiene en cuenta que los datos del perfil son discretos, es decir, son adquiridos mediante muestreo (una cota cada determinado intervalo), el IRI es la media aritmética de la sumatoria de todos los valores de la variable $|z'_2 - z'_1|$ en la longitud de evaluación.

La expresión algebraica que permite obtener el IRI es:

$$IRI = \sum_{i=1}^n |Z'_2 - Z'_1| / n; \text{ Perfil discretizado} \quad (1)$$

Si por cualquier circunstancia se dispusiera de una función que definiera el perfil, la expresión anterior se convierte en:

$$IRI = (1/L) \int_0^L |Z'_2 - Z'_1| dx; \text{ Perfil continuo} \quad (2)$$

Donde:

- n = Número de puntos
- L = Longitud de análisis;
- $|Z'_2 - Z'_1|$ = Valor absoluto de la pendiente rectificada.

El cálculo de las expresiones anteriores es bastante laborioso y debe realizarse mediante ordenador. A tal efecto se ha desarrollado una aplicación informática llamada CALIRI que en función de las ordenadas del perfil, leídas de un fichero ASCII, calcula el valor del IRI para cualquier longitud y para cualquier intervalo de muestreo. Si bien se recomienda la evaluación por hectómetro, así lo refleja la Orden Circular citada, y una frecuencia de muestreo del perfil de 25 o 30 cm, es decir, 400 o 333 cotas por hectómetro.

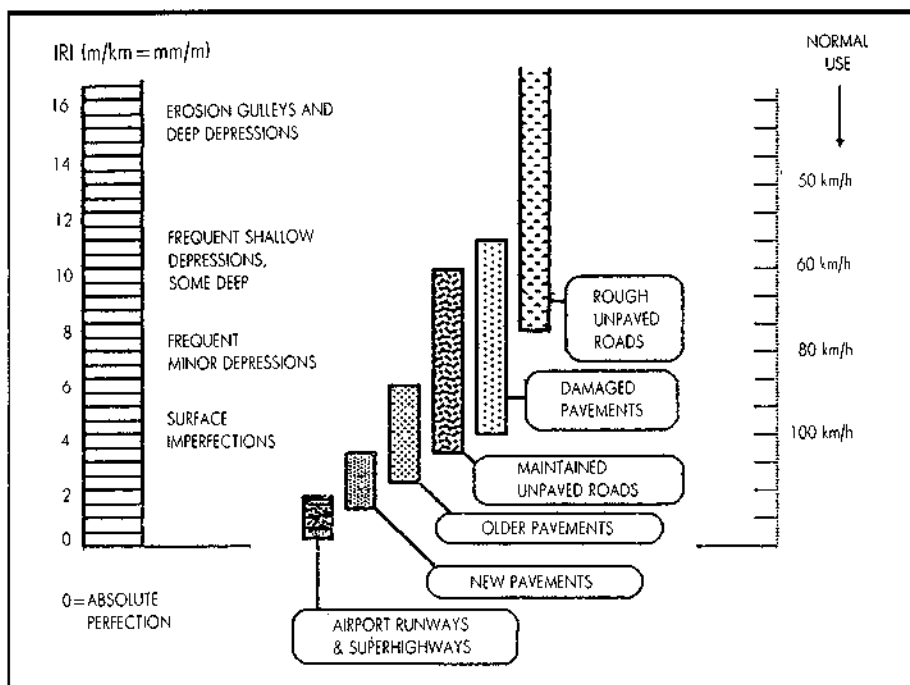
Con todo ello se puede llegar a una definición del IRI.

«EL IRI ES LA MEDIA DE LA PENDIENTE RECTIFICADA DEL PERFIL FILTRADO, MEDIANTE EL MODELO DE CUARTO DE COCHE NORMALIZADO (GOLDEN QUARTER CAR), PARA UNA VELOCIDAD DE 80 km/h, EN LA LONGITUD DE ANALISIS».

2.4. ESCALA DEL IRI

Sin duda, una de las cuestiones que más interesa al técnico de carreteras es la escala de referencia de los valores del IRI.

A este respecto, se han iniciado una serie de estudios que han servido de base para la elaboración de la orden circular citada. No obstante queda cierto camino por recorrer para definir a nivel español la escala de IRI deseable para carreteras en servicio o carreteras de la red secundaria o en actuaciones de refuerzo, por este motivo se ha optado por adjuntar la versión original de la tabla que figura en la publicación del Banco Mundial «Guidelines for Conducting and Calibrating Road



ESQUEMA 2.

Roughness Measurements», que asimismo ha servido de base para toda la exposición anterior relativa al IRI.

En el esquema 2 se presenta la tabla de escalas del IRI del Banco Mundial.

3. MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL CON EL EQUIPO DIPSTICK

3.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El Dipstick (Digital Incremental Profiler) es un equipo electrónico de alta precisión para la medida de la regularidad superficial de pavimentos.

El equipo obtiene y graba, automáticamente en la memoria del microordenador incorporado, la diferencia de cotas entre puntos separados secuencialmente 300 mm. Los datos de elevación registrados, se utilizan, mediante la aplicación informática suministrada con el equipo, para la obtención del IRI (Índice de Regularidad Internacional).

La utilización del equipo es manual, mediante un operador que puede ensayar una longitud entre 120-160 m/h, obteniendo simultáneamente el IRI.

Es un equipo de pequeño rendimiento, aunque llega a ser 10 veces superior a la topografía convencional.

3.2. COMPONENTES DEL EQUIPO

El Dipstick consta de los siguientes elementos:

- Módulo principal del Dipstick Road Profiler, con lectura automática.
- Ordenador portátil TRS-80 PC-2 de 18 Kb.
- Impresora matricial de 4 colores, tamaño de papel de 2 1/4".
- Cassette grabador.
- Cables de conexión.
- Modem y RS 232 en serie.
- Micro-cassette grabador reproductor.
- Software de análisis del IRI.
- Manual de instrucciones.
- Maleta de aluminio para guardar el equipo.

En las fotos 1 y 2 y el esquema 3 adjunto se puede visualizar el equipo.

3.3. REALIZACION DE LOS ENSAYOS

Para la realización de los ensayos, se recomienda la medida de las líneas que coincidan aproximadamente con las trayectorias seguidas por los vehículos en el carril, o al menos una de ellas. Para un carril de 3,5 m de ancho se puede considerar que la línea o rodada derecha



FOTO 1.

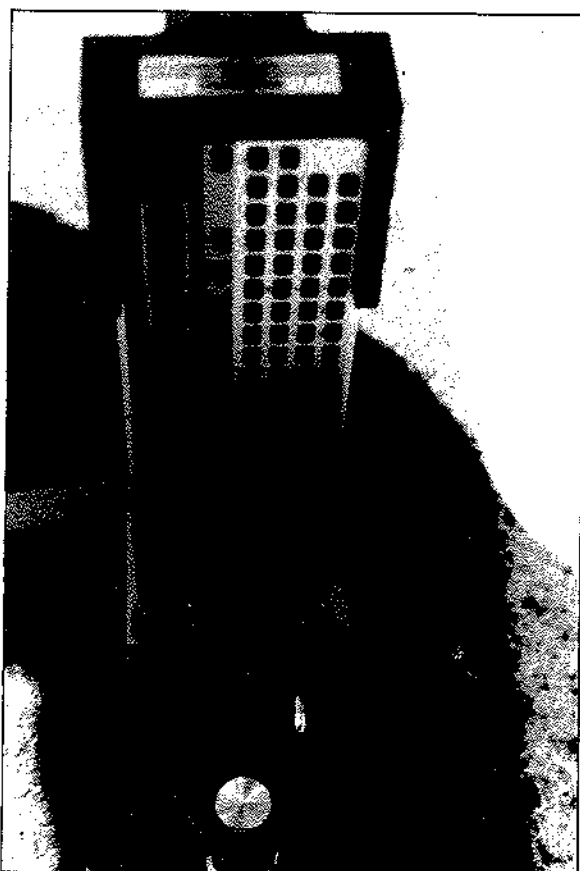
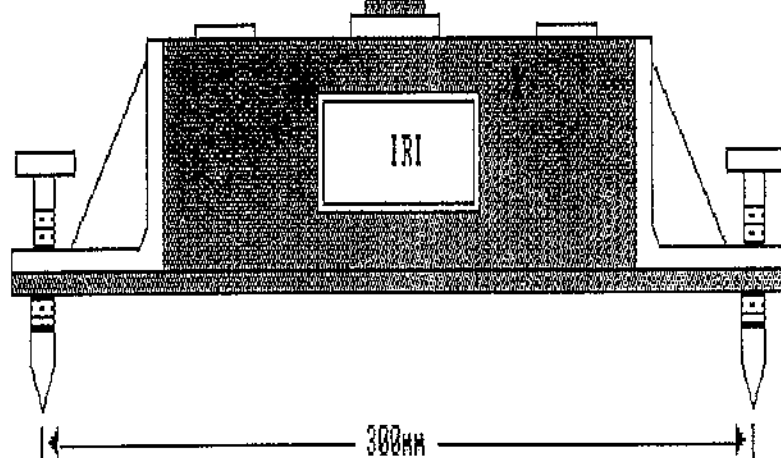


FOTO 2.

Dipstick



ESQUEMA 3.

se sitúa entre 0,8 y 1,0 m del borde derecho del carril o borde izquierdo de la línea blanca continua que separa el carril del arcén, y la otra rodada se sitúa entre 0,8 y 1,0 m del borde izquierdo del carril o borde derecho de la línea blanca discontinua que separa los dos carriles de una calzada.

Durante la realización de los ensayos, el operador, andando, traslada el Dipstick sobre la línea de medida del pavimento, pivotando alternativamente el equipo alrededor de cada punto de apoyo («pins») (foto 3).

La toma de los datos es automática, con una precisión de $\pm 0,05$ mm, registrándose la diferencia de cotas relativas entre puntos equidistantes 300 mm.

El equipo lleva incorporada una salida RS 232 que permite la conexión con un ordenador IBM PC o compatible, y un módem para transmisión de datos.

3.4. SALIDA DE RESULTADOS

Mediante la aplicación del programa de cálculo DIPI-RI-M suministrado con el equipo, se obtienen las salidas de resultados de los diversos puntos medidos que queda establecida de la siguiente forma:

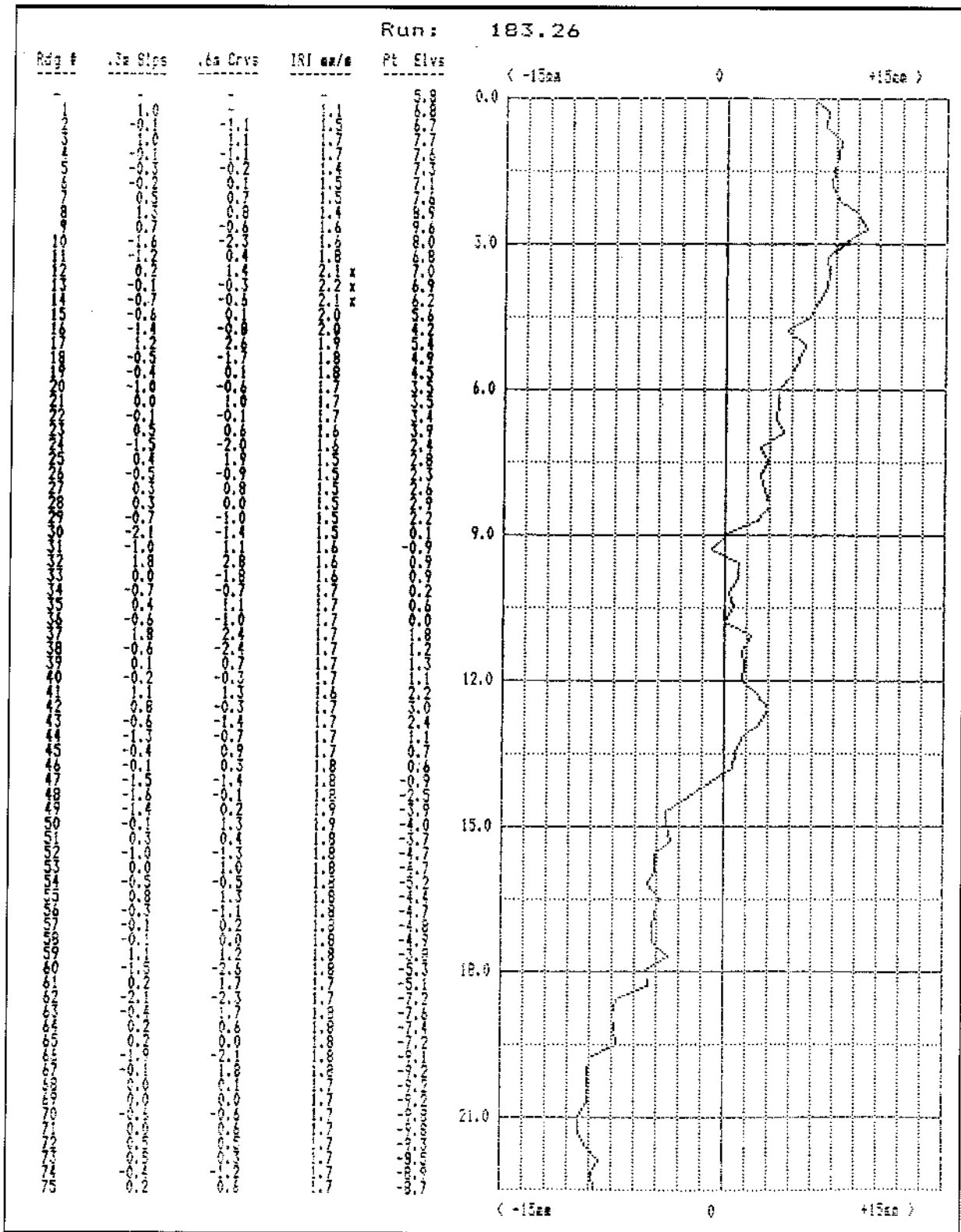
— Número de punto de lectura.

- Lectura del Dipstick.
- Curvatura definida por tres puntos, en mm.
- IRI de estos puntos, en mm/m.
- Ordenadas del perfil, en mm.
- Distancia desde el origen, en mm.
- Representación gráfica del perfil medido.

Asimismo presenta un resumen estadístico del tramo ensayado, o de un subtramo (por ejemplo por hectómetros) si el usuario lo requiere, que proporciona los siguientes valores:

- Cota del punto más alto del perfil y su posición.
- Cota del punto más bajo del perfil y su posición.
- Valor medio.
- Desviación típica.
- IRI acumulado, en mm/m ($= \text{m/km} = \text{dm/Hm}$).
- Desplazamiento total del modelo de cuarto de coche.
- Número-F indicador según Norma ASTM E-1155 (sin aplicación en España).

A modo de ejemplo se adjunta una copia de la salida de resultados (ver esquemas 4 y 5).



ESQUEMA 4.

Road Profile Analysis

Run: 183.26

Project name : N-IV
 Test date : 21/9/89
 Specified FF# : 13
 Specified IRI : 2
 Elev tol (+-) : N/A
 Design slope : N/A
 Operator bias : N/A
 Start pt elev : N/A

Pt 0 Elev: 5.8 Pt 75 Elev: -8.7 Reprs'n slp: -0.8 mm/m

	No. Rdgs	Avg Rdg	Std Dev	Highest Rdg	Hi Pt	Lowest Rdg	Lo Pt
.3m SLOPES mm:	75	-0.2	0.85	1.8	32	-2.1	30
.6m CURVES mm:	74	-0.0	1.22	2.8	32	-2.6	60
ROD SLPS mm/m:	75	1.7	1.17	5.4	12	0.0	25
PT ELEVATIONS mm:	76	-0.0	5.66	9.6	9	-9.8	70

ESTIMATED ACI FF-NUMBER = 31.11 < 26.59 - 35.62 >

60.29 % of an F- 31.1 road is equivalent to F- 13.0

39.71 % of an F- 31.1 road is SUPERIOR to F- 13.0

INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX = 1.72 mm/m < 108.86 in/mi >

% points above IRI- 2 = 4.00 % < 3 out of 75 >

Total quarter-car displacement = 386.6 mm < 15.220 inches >



FOTO 3.

3.5. CAMPOS DE APLICACION

Los campos de aplicación principales son:

- Sistema de calibración de equipos de medida de la regularidad de alto rendimiento.
- Control de calidad de terminación de las capas de firmes en ejecución.

- Control de regularidad de superficies limitadas, como tableros de puentes, losas de hormigón, nivelación de juntas y/o zonas de transición, calles, etc.
- Estudios especiales de regularidad, comprobación de tramos de ensayo, pruebas de maquinaria de extendido, análisis de la eficacia del fresado, etc.

4. CONCLUSIONES

En las páginas anteriores se ha hecho una descripción del índice IRI de aplicación a la valoración de la regularidad superficial de pavimentos y de su obtención con el equipo Dipstick.

Señalar la importancia que la regularidad superficial de los pavimentos de carreteras tiene tanto para los usuarios como para los técnicos relacionados con la carretera, que su evaluación se debe adaptar a los criterios más significativos y que a este respecto el IRI viene a ser, a nuestro entender, el más serio y logrado intento de normalizar a nivel internacional la valoración de la regularidad superficial.

Como primeras conclusiones se recomienda la valoración del IRI por hectómetros y con una frecuencia de muestreo del perfil intensa del orden de 25 o 30 cm. La medida se debe realizar sobre una o las dos líneas del perfil longitudinal que mejor representen las trayectorias seguidas por las ruedas de los vehículos.

Asimismo indicar que el Dipstick es un equipo de pequeño rendimiento, pero muy fiable para determinar el IRI. Con unos campos de aplicación específicos, en particular de fácil y útil empleo en el control de la terminación de capas de firmes, ya que con rapidez suficiente, bajo coste y mayor fiabilidad que la regla de 3 metros, se puede tener una información precisa y continua de la calidad de la construcción.

Existen una serie de trabajos en marcha encaminados a profundizar y mejorar el conocimiento del estado actual de la regularidad superficial y de los valores existentes y deseables del IRI de las carreteras españolas, que se tratarán en un próximo artículo.



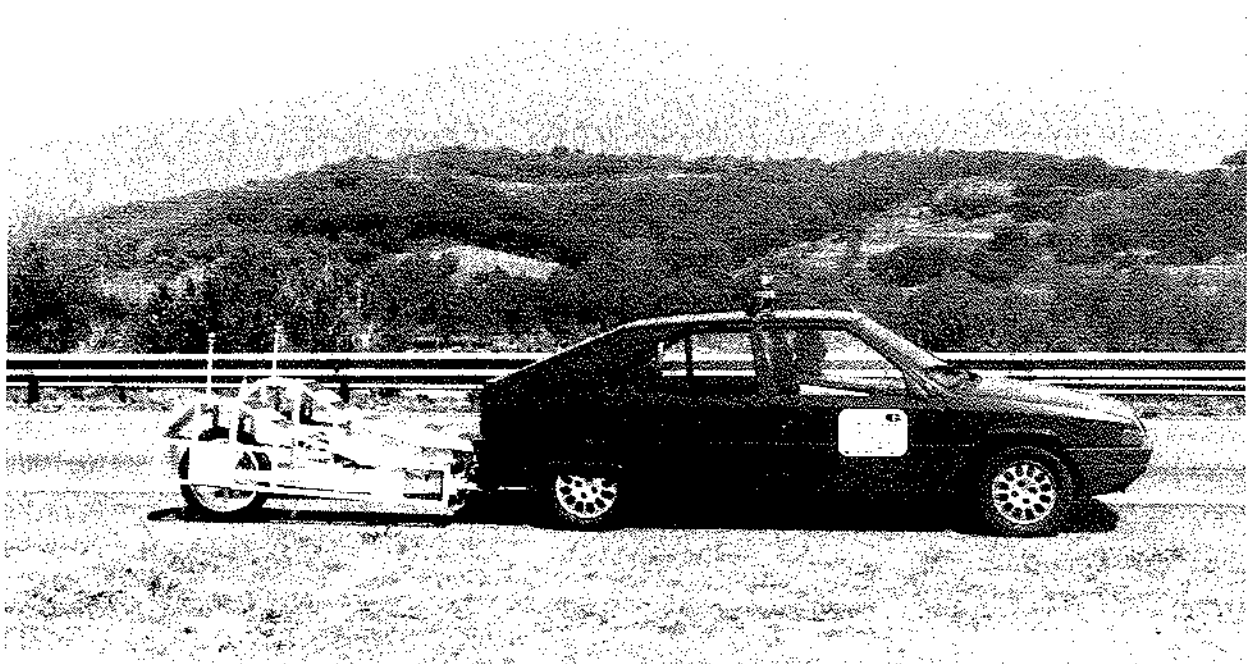
GEOCISA

GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.

LOS LLANOS DE JEREZ, 10 y 12, Pol. Industrial de Coslada • COSLADA (Madrid)

☎ 671 31 08 - 671 53 00

Comprobación de la REGULARIDAD SUPERFICIAL de las Obras de Carreteras



Una de las posibilidades del vehículo ARS
es la de sustituir a la regla de 3 m.
en la comprobación de la Regularidad Superficial del Firme
de UNA OBRA RECIEN TERMINADA.

La comprobación se realiza de forma continua y rápida,
a una velocidad superior a los 20 Km/h.