

Simulación de la corrección de la regularidad superficial de una carretera. Programas de cálculo de la Regla de 3 metros y del Viágrafo

Por **Manuel J. Melis**
Dr. Ing. de Caminos, M. Sc., MBA
AEPO S.A. Ingenieros Consultores.



Viágrafo. Aunque parezca increíble, aún había nuestro Pliego de este antiguo equipo. El programa de cálculo de la Norma no lo puede comprobar quien debe pagar el coste de la eventual reparación.

Resumen

La exigencia de un IRI menor que 2.5 dm/hm para la recepción de las obras de carreteras de nueva construcción, tiene una importante repercusión económica en los casos en que es necesario fresar o rectificar el pavimento recién construido. Evidentemente, los resultados de una medición del IRI deben analizarse con mucho detalle antes de comenzar un arreglo del pavimento; en

algunos casos se constata que se desconocen los algoritmos de cálculo del IRI en los equipos que lo miden, y por otra parte, además de otras peculiaridades del IRI tales como su exageración de los defectos de longitud de onda de 2 m, el IRI producido en un hectómetro por un obstáculo como una junta depende de dónde esté situada dentro del hectómetro medido. En consecuencia es lógico pensar que en muchos casos de IRI defectuoso todavía se irá a la evaluación del pavimento por la Regla de 3 metros o por el Viágrafo, que son las

comprobaciones contractuales recomendadas actualmente por el Pliego.

Obtener el perfil longitudinal de un tramo de carretera no es difícil ni caro, y por tanto puede disponerse de él en los casos de IRI dudoso. Una vez que se tiene el perfil longitudinal, con los programas que aquí se describen es posible calcular los valores de la Regla de 3m y del Viágrafo sin tener que pasar físicamente estos equipos por la carretera.

En este artículo se presentan dos sencillos programas de simula-

“**C**on los presentes programas de la Regla y Viógrafo, y el del IRI de un artículo anterior, pueden simularse casi todas las reparaciones de un tramo y elegir la solución más

”

ción de la Regla de 3 metros y del Viógrafo respectivamente, de forma que el usuario que dispone de su perfil longitudinal pueda hacer las comprobaciones de la regularidad del pavimento desde el propio despacho de obra. Los programas permiten identificar exactamente los puntos de la carretera que producen las irregularidades, de forma que su corrección es mucho más económica, eficaz y rápida. Los programas, a disposición del lector, están escritos en C, y sus rutinas gráficas dibujan el movimiento de la Regla o del Viógrafo por la carretera, de forma que pueden visualizarse las zonas buenas y malas con mucha comodidad. Debe tenerse en cuenta que la Regla y el Viógrafo exageran los efectos de alguna longitud de onda, y no acusan los de otras. Deben tenerse en cuenta también que la rueda medidora de la Regla o el Viógrafo tienen diámetro apreciable, mientras que la simulación en micro con estos programas es una rueda de radio infinitesimal, por lo que acusa algo más los defectos.

Para los lectores poco aficionados a programar con lenguajes como C, se incluyen también dos algoritmos: uno para calcular la Regla de 3m simplemente con LOTUS 123, y otro similar para el cálculo del perfil aproximado del Viógrafo con la misma hoja electrónica. Con los programas descritos en el presente artículo y el del IRI de un artículo anterior (6) pueden verse, paso a paso, (cada 25 cm por ejemplo) el IRI, la Regla de 3 m y el Perfil del Viógrafo, y la identificación de los eventuales



Regla de 3 m. También la citan aún el Ptiego y la normativa.

defectos a corregir es rápida y cómoda. Puede además hacerse la SIMULACION del arreglo, modificando el perfil longitudinal en el micro y volviendo a correr los programas hasta obtener el valor deseado para el IRI, la Regla o el Viógrafo, y buscar así la solución más económica de fresado.

1. Generalidades y Antecedentes.

La Orden Circular 308/89CyE de fecha 8 de Septiembre de 1989 de la Dirección General de Carreteras del MOPT, establecía el IRI por primera vez en España como indicador de la regularidad del tramo. Fijaba el valor del IRI 2 dm/hm como umbral superado el cual “no se podrá recibir la obra a no ser que se comprobase el estricto cumplimiento de las prescripciones contractuales (Regla de 3 m y, para pavimentos de mezcla bituminosa, Viógrafo)”.

La Orden Circular 311/90CyE del 23 de Marzo del 90 modifica el PG3 en el artículo 550 de Pavimento de Hormigón Vibrado, indicando en el apartado 550.9.3.3 que se controlará la regularidad superficial del lote con la Regla móvil de 3 m y con Viógrafo, y que se medirá el IRI en todo caso antes de la recepción definitiva de las obras. El apartado 550.9.3.4.1 insiste en la Regla y el Viógrafo, e indica que donde no se cumplan las condiciones, el Contratista po-

drá optar por fresar las zonas altas o esperar a la medición del IRI. En las Prescripciones se fija el IRI en 2 dm/hm (Apartado 550.6.3.4), y finalmente, en el Apartado 550.9.4.1 se indica que este IRI 2 tiene “una probabilidad razonable de cumplirse” cuando la Regla de 3 m de un valor máximo de 3 mm y simultáneamente el Coeficiente de Viógrafo de un valor de 5 como media del lote y 15 de máximo en 1 hm (para velocidades de proyecto menores de 100 km/h se aumentan algo las tolerancias).

En fecha 9 de Octubre de 1991 esta exigencia del IRI de 2 dm/hm fue matizada por una Nota de Servicio complementaria, que admitía un valor máximo absoluto de IRI 2,5 en todo el tramo, siempre que en el 80% del tramo se alcance como máximo el IRI 2, y debiendo alcanzarse además el IRI 1,5 en la mitad del tramo. Esta Nota de Servicio fijaba también exigencias mínimas a las capas inferiores del firme, que son las siguientes:

Umbral, IRI (dm/hm) Porcentaje de tramo			
CAPA	50%	80%	100%
RODADURA	1,5	2,0	2,5
INTERMEDIA	2,5	3,5	4,5
BASE	3,5	5,0	6,5

La norma indica que el IRI debe seguirse calculando cada 100 metros. La propia norma indica, además, que los valores indicados (sic) deben interpretarse en el sen-

tido de que, por ejemplo, para la capa de rodadura:

- El 100% del tramo debe tener un IRI menor de 2,5 dm/hm.

- Al menos el 80% del tramo debe tener un IRI menor de 2,0 dm/hm.

- Al menos el 50% del tramo debe tener un IRI inferior a 1,5 dm/hm.

Los expertos parecen entender que esta normativa es aplicable a todo tipo de pavimento, y que tal vez deberían dejar de ser válidas las referencias a la Regla de 3m y al Viágrafo, pero como siguen incluidas en el Pliego, probablemente el Artículo 550.9.3.3 sigue vigente.

2. Algunos problemas de los métodos de cálculo del IRI.

El cálculo del IRI sigue teniendo alguna inconsistencia que no ha sido aclarada por los técnicos del Banco Mundial que lo propusieron como estándar. En nuestro artículo anterior sobre el "Cálculo del IRI a partir del perfil longitudinal de una carretera" ya llamábamos la atención sobre las dificultades que un ingeniero normal y corriente, como el autor, encuentra incluso para seguir el proceso de cálculo que el Banco recomienda. Creemos que el método de integración que proponíamos en dicho artículo puede ayudar a otros técnicos a aclarar este punto, ya que integra el sistema de ecuaciones del cuarto de coche por diferencias finitas muy sencillas. Conocidas las posiciones y velocidades de las masas superior e inferior, el IRI se define como:

(Ec 1)

$$IRI = \frac{1}{V(n-1)} \sum_{i=2}^n |\dot{z}_u - \dot{z}_i|$$

donde V es la velocidad del cuarto de coche (80 km/h), y las z indican las cotas de las masas superior e inferior, de forma que sus derivadas son las velocidades de dichas masas.

Las velocidades pueden ponerse en la forma siguiente:

(Ec 2)

$$\dot{z} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta t}$$

de forma que la expresión del IRI puede tomar la forma:

(Ec 3)

$$\begin{aligned} IRI &= \frac{1}{V(n-1)} \sum_{i=2}^n |\dot{z}_u - \dot{z}_i| = \\ &= \frac{1}{V(n-1)} \sum_{i=2}^n \left| \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta t} - \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t} \right| = \\ &= \frac{1}{V(n-1)} \sum_{i=2}^n \left| \frac{(u_{i+1} - u_{i+2}) - (u_i - v_i)}{\Delta t} \right| = \\ &= \frac{\Delta t}{\Delta x(n-1)} \sum_{i=2}^n \left| \frac{d_{i+1} - d_i}{\Delta t} \right| = \\ &= \sum_{i=2}^n \left| \frac{d_{i+1} - d_i}{\Delta x(n-1)} \right| \approx \frac{\sum_{i=2}^n |d_{i+1} - d_i|}{L} \end{aligned}$$

donde d es la distancia entre las masas superior e inferior.

(Ec 4)

$$IRI = \frac{1}{\Delta x} \sum_{i=2}^n \left| \frac{d_{i+1} - d_i}{(n-1)} \right|$$

Lo importante de esto, y el motivo de que se cite aquí, es que se ve con claridad que el Método que el Banco Mundial recomienda y propone para calcular el IRI lo hace dividiendo en cada paso por el número de intervalos de muestreo recorridos desde el origen de cada hectómetro o tramo de medida. En el programa de cálculo del IRI que incluye el Banco Mundial en (1) en BASIC puede verse la división, aunque las variables del numerador son muy confusas para un lector no especialista, por utilizar el



En esta expresión se ve que el IRI es la sumatoria de los desplazamientos (en valor absoluto) de la masa superior con respecto a la inferior dividida por la distancia recorrida, es decir, por la longitud del tramo.

El incremento de x en la expresión anterior es la separación entre puntos de la carretera en que se ha calculado la cota. Esta separación es constante para cada equipo (p. ej. 25 ó 30 cm para el DIPSTICK de IIC, en España, ó 12,5 cm para el equipo Láser RST, o 1 m si se toma el perfil con mira y nivel a esa distancia). Por tanto puede salir de la sumatoria, y la expresión del cálculo del IRI queda:

Método de la Ecuación de Estado para integrar el sistema. En cualquier caso, y a los efectos de este artículo, se ve que el IRI se calcula en cada intervalo de muestreo, pero el divisor en cada paso es el número de intervalos recorridos desde el origen del tramo analizado. Las implicaciones de este método de cálculo para la identificación y corrección de defectos son muy importantes, y ejemplos sencillos han sido dados por R. Crespo y el autor en (7). Piense el lector que una ondulación de 2 cm de alto y 4 metros de largo produce un IRI 8 si está al principio del tramo de 100 metros, como indica la Figura 3 de (6), pero mucho menor si

“**O**btener el perfil longitudinal de una rodada es rápido y económico con los equipos de alto rendimiento, pero puede obtenerse también con mira y nivel o con el perfilógrafo fabricado en España.”

está al final, ya que el divisor de la Ec. 4 sería 400 en lugar de 4.

Si el problema de un arreglo de la rodadura no se estudia dándole la importancia que tiene, en algunos casos será necesario rectificar todo el tramo de 100 metros que ha dado el IRI defectuoso. A un coste de 600 pt/m², 100 metros por 7 de ancho (sin contar arcenes) representan 700 m², es decir, 420 000 pt. Si se trata de un defecto puntual o zonal el problema tal vez se resolvería analizando en detalle el tramo y rectificando solamente el o los pequeños defectos que causan el problema, y que puede suponer fresar sólo 20 m de longitud. El coste sería de 140 m², es decir, 84 000 pt. En un caso extremo y exagerado como este ejemplo, el análisis detallado de un tramo puede reducir el coste del arreglo en un factor de 5.

En general, en los equipos que miden el IRI en España y otros países resulta muy difícil saber en detalle cómo lo calculan, pese a lo importante que es el algoritmo. Lamentablemente, los programas suelen ser cajas negras programadas por “expertos”, y pueden contarse con los dedos de una mano, y probablemente sobrarán, los casos en que el técnico responsable puede explicar a su Cliente los detalles de cálculo y reiniciación del contador interno a que hemos hecho referencia. Y a la vista de la enorme importancia económica que tiene el IRI para la recepción de las obras (y para su mantenimiento y conservación) es natural que surjan graves discrepancias entre Cliente y Constructor ante un IRI

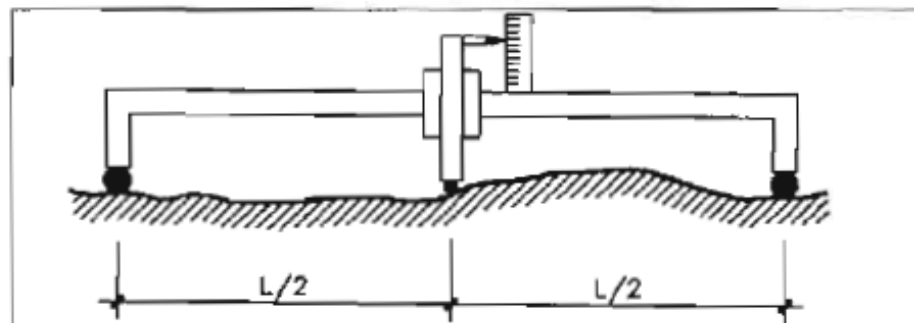


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la Regla de 3m.

malo. Y ello dejando aparte el hecho de que los viejos equipos mecánicos que todavía se usan en España, en algunos casos dan medidas de muy dudosa fiabilidad (en algunos países ya han dejado de utilizarse los equipos mecánicos o los basados en ultrasonidos debido a éstos y otros problemas). Con el programa descrito en un anterior artículo (6) puede irse viendo gráficamente la evolución del IRI cada 25 cm e incluso, ir viendo cómo se mueven las dos masas del cuarto de coche, una con respecto a la otra, de forma que se ayuda mucho a la identificación de las zonas a reparar.

3. La Regla de 3 metros.

Por todo lo anterior, la Regla de 3 m no ha muerto aún. En muchas ocasiones es la única solución para salir de dudas sobre un IRI en discusión.

La Norma de Ensayo de la Regla de 3m (NLT-334/87) describe el equipo mecánico necesario para hacer el ensayo y cómo se realiza éste. Básicamente el ensayo consiste en pasar una viga rígida (flecha inferior a 0,2 mm) apoyada en dos ruedas cuya distancia entre ejes es de 3 m. La viga lleva una rueda de medida en su punto medio con libertad de movimiento vertical, y el desplazamiento vertical de esta rueda central es lo que se define como la medida de la Regla. Ver Figura 1. En definitiva, el valor de la Regla de 3m es la diferencia entre la media de las cotas de los extremos de la regla y la cota de la carretera en el punto medio de la Regla.

Pasar la Regla físicamente por un tramo es una operación pesada y engorrosa, aunque sea más rápida que el DIPSTICK. Para simular la Regla de 3m es necesario dispo-

ner del perfil longitudinal de la carretera y aunque la forma más exacta de obtenerlo es con mira y nivel, del que siempre se dispone en las obras, las estaciones totales actuales permiten obtener las lecturas y hacer los cálculos con gran rapidez, y puede elegirse la distancia de muestreo que se desee (la distancia más conveniente es 0,25 ó 0,30 m). Otro método de obtener el perfil longitudinal es usar el DIPSTICK español, mejor que el americano por disponer de 0,25 y 0,30 m como intervalos de muestreo. Sin embargo, el DIPSTICK mide realmente inclinaciones, y por ello, es necesario obtener el perfil con un postproceso de la medida real. Sin duda la forma más rápida y eficaz de obtener el perfil longitudinal es por medio del Video-Láser RST, que lo puede proporcionar a alta velocidad y con intervalos de hasta 12,5 cm ó 10 cm. Los equipos mecánicos no son fiables y deben usarse, si no hay otra alternativa, con mucha precaución.

4. Simulación de la regla de 3m por ordenador (Figura 2).

Ya se ve que el problema es sumamente sencillo. Se trata simplemente de ir leyendo punto a punto el perfil longitudinal de la carretera del fichero ASCII que lo contenga. Debe tenerse siempre leído en memoria un número de intervalos tal que la distancia entre el primero y el último sea de 3 m. Supongamos para mayor sencillez que el intervalo sea divisor de 3m, por ejemplo, 0,50 m. El proceso de cálculo es el siguiente:

1. Se coloca el principio de la Regla en el primer punto leído. Sea éste el punto número 1, que tiene abscisa 0.0. Sea z_1 la cota de la carretera en este punto.

2. Se coloca el final de la regla a los 3 m exactos del anterior. En este caso es el punto número 7, cuya abscisa es 3.0 metros. Sea z_7 la cota de la carretera en este punto. (Si la distancia entre puntos no es divisor exacto de la longitud de la regla, se interpola linealmente entre los dos puntos de perfil longitudinal en que caiga el extremo. En este programa la interpolación es lineal, aunque puede hacerse también cuadrática o por splines cúbicos).

3. Se calcula la cota de la regla en su punto medio. La cota obtenida será $z_r = (z_1 + z_7) / 2$.

4. Se lee la cota de la carretera en el punto que corresponde a la mitad de la Regla. En este caso será el punto 4, y la cota de la carretera será z_4 .

5. La medida de la regla en ese punto será $z_r - z_4$.

6. Se graba el valor obtenido en un fichero ASCII de resultados, que pueda leerse con Lotus posteriormente para dibujar el perfil y la medida de la regla simultáneamente.

7. Se lee un nuevo punto de la carretera y se repite el proceso anterior.

8. Se repite el proceso hasta llegar al final del fichero del perfil longitudinal.

El programa completo con el cálculo y el dibujo de la Regla de 3m está a disposición de los lectores interesados.

5. Comprobación del algoritmo de la Regla de 3m.

La comprobación del algoritmo puede hacerse a partir de los trabajos de R. Crespo (5), en que presenta una función de transferencia de la Regla de 3m para funciones sinusoidales. Como puede verse, para un perfil sinusoidal de 3 m de longitud de onda (Figura 3), la curva obtenida por la regla es una senoide de la misma longitud de onda y de amplitud doble. El resultado se intuye perfectamente, ya que se ve que la medida de la Regla es siempre el doble de su ordenada, ya que para este caso particular (longitud regla = longitud de onda) la regla siempre está horizontal. De la misma forma se ve que la Regla no acusa los defectos de longitud de onda 1.5 m, por ser nula su función de respuesta de

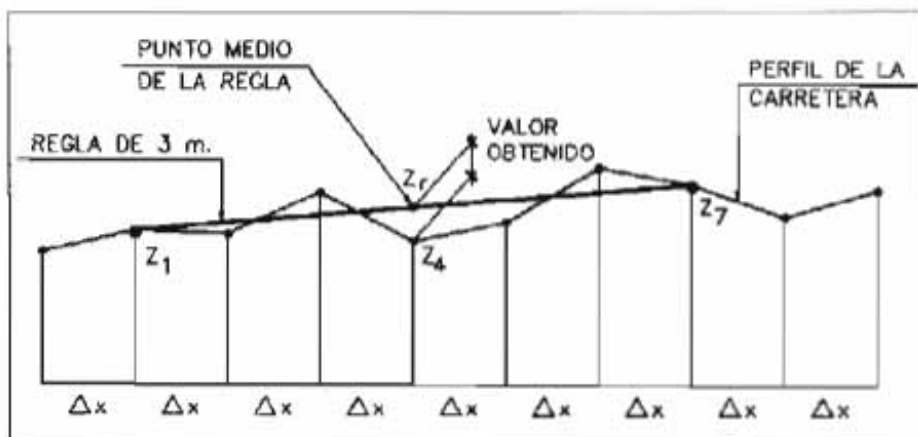


Figura 2. Esquema de cálculo
(Para mejor comprensión se supone $L = 6\Delta x$)

frecuencias para esta longitud de onda, fenómeno físico que se intuye también con claridad.

6. Cálculo de la Regla de 3m con hoja electrónica.

El algoritmo de la Regla de 3m en un perfil no es más que un filtro digital sobre el mismo, similar por ejemplo a una media móvil. Pero es un filtro tan sencillo que ni siquiera hace falta el programa anterior, ya que si se tiene el perfil longitudinal en una columna de una hoja electrónica, puede calcularse la Regla simplemente con una sencilla fórmula.

Supóngase que la distancia entre puntos es de 0.25 m. Si el perfil está situado en la columna A y comienza en la fila 1 ($x = 0.0$), se busca la $x = 1.5$, que aparece en la fila 7. En esta fila y en la columna B se calcula la media de las cotas para $x = 0$ y $x = 3$, y se resta la cota correspondiente a $x = 1.5$. El valor obtenido es el valor de la Regla de 3m.

La fórmula a poner en la celda

B6 es: $+(A1 + A13) / 2 - A7$. Se copia a continuación a lo largo de toda la columna B hacia abajo hasta el final del fichero, excepto los últimos 1.5 m. En caso de que la distancia entre puntos no sea divisor de 3, la simulación no es exacta y es mejor utilizar el programa, aunque la aproximación es en todos los casos sorprendentemente buena.

7. El Viógrafo.

El Viógrafo es un antiquísimo aparato (la referencia (9) es de 1956, de forma que debe utilizarse al menos desde finales de los años 40) que consiste básicamente en 4 Reglas similares a la de 3m anterior, pero de 1.33 m de longitud, unidas por balancines como muestra la figura 4 (ver página siguiente). Puede verse descrito y detallado en (5) y (8).

La figura 5 (ver página siguiente) describe la ordenada del Viógrafo, que es la diferencia de la cota de la carretera en el punto medio del Viógrafo menos la media arit-

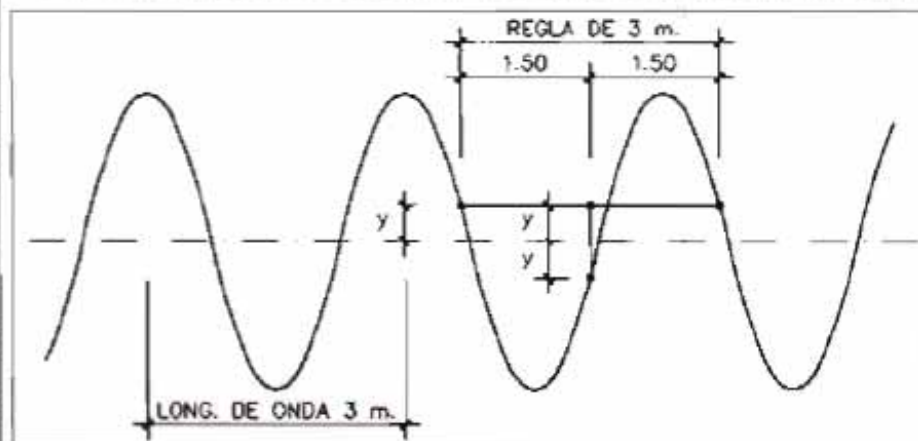


Figura 3. Obsérvese que en una senoide de 3 m la regla de 3 m produce otra senoide igual y de doble amplitud.

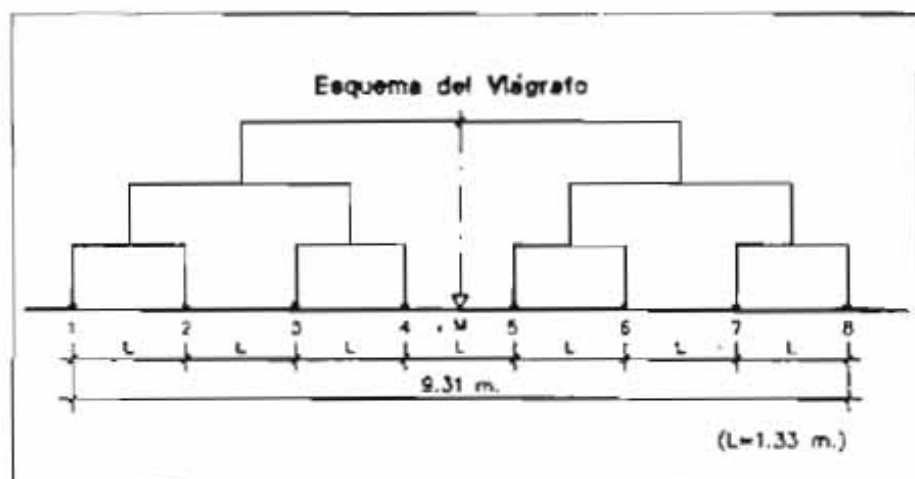


Figura 4. El Viógrafo está formado por 4 reglas de 1,33 m unidas por balancines en sus puntos medios.

métrica de las cotas de las ocho ruedas. Tras pasar el Viógrafo por la carretera y obtener la serie de medidas del tramo, de éstas se obtienen los siguientes valores:

Coefficiente del Viógrafo (CV), definido por la Norma NLT 332/87 como "el doble del área a escala natural de la superficie comprendida entre la línea irregular del perfil obtenido y la línea media (estimada o calculada), expresada en dm^2/hm y calculada por rectángulos inscritos de 5 mm de altura".

Coefficiente de Irregularidad (CI), definido como "la suma de diferencias superiores a 1 mm de ordenadas entre máximos y mínimos consecutivos de la línea del perfil obtenido, expresada en mm".

Varianza (σ) de las ordenadas respecto a la línea media estimada. La fórmula de la Norma, realmente es la desviación típica en lugar de la varianza. Debe ser un error.

Coefficiente de Áreas (CA), definido como "la suma de los valores absolutos de las diferencias de ordenadas, superiores a 3 mm, entre la línea del perfil obtenido y la línea media (estimada o calculada), multiplicadas por 10 y divididas por el número de ordenadas, expresadas en dm^2/hm ".

Como las irregularidades del pavimento sólo se miden con el Coeficiente del Viógrafo en la Norma actual, sólo nos ocuparemos de este parámetro. El Apartado 542.6.5.3 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales, prescribe los siguientes valores máximos del Coeficiente de Viógrafo para mezclas Bituminosas:

CAPA	VELOCIDAD ESPECÍFICA	MAXIMO CV (dm ² /hm)	
		MEDIA DEL LOTE	MAXIMA EN 1 hm
RODADURA	≥ 100	5	15
INTERMEDIA	≥ 100	7	20
BASE	≥ 100	15	25
RODADURA	< 100	7	20
INTERMEDIA	< 100	10	25
BASE	< 100	20	30

8. Simulación del Viógrafo por ordenador. Cálculo del perfil del Viógrafo.

El cálculo del perfil del Viógrafo es igual al de la Regla de 3m, y es también sumamente sencillo. Consiste en aplicar sucesivamente al algoritmo anterior de la Regla de 3m a cada una de las 4 Reglas de 1,33 m que componen el Viógrafo, teniendo en cuenta la abscisa origen de cada una con respecto a la primera (Figura 5). Se trata simplemente de ir leyendo el perfil

de la carretera y colocar la rueda izquierda (nº 1) del Viógrafo en cada punto del perfil sucesivamente hasta que la rueda 8 llega al final del fichero. En cada posición se calcula la abscisa de cada una de las otras 7 ruedas, y la cota de terreno correspondiente. Con estos datos se van calculando las medias de las cotas dos a dos, hasta llegar a la cota del Viógrafo. Se calcula a continuación la cota del terreno en la abscisa media del Viógrafo (es decir, a 9.31/2 metros de la rueda izquierda), y se obtiene la ordenada del Viógrafo por diferencia. Como la longitud base del Viógrafo que se utiliza en España es tan rara

(9,31 m, que equivale a 7 intervalos entre ruedas de 1,33 m), al ir colocando la primera rueda del Viógrafo en cada punto del perfil longitudinal, nunca caerán las ruedas 2 a 8 en puntos del perfil, por lo que siempre hay que interpolar. El programa aquí descrito interpola linealmente.

Hay una diferencia importante, sin embargo, con respecto a la Regla de 3 m. Como el Viógrafo es mucho más largo, la curvatura en alzado de la carretera podría tener influencia en el valor de la ordenada del Viógrafo. En la Fig. 6 se

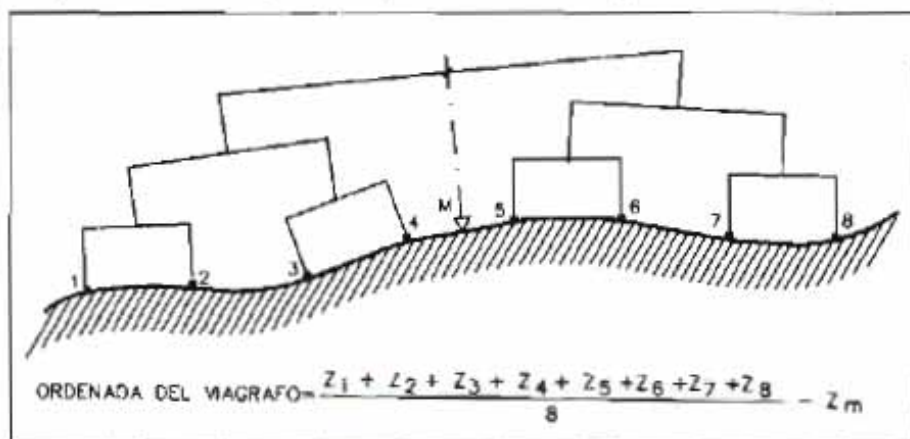


Figura 5. La ordenada del Viógrafo es la diferencia entre la cota media de las ocho ruedas y la cota de la carretera en el punto medio del viógrafo.

“**E**l algoritmo de la Regla de 3 m es tan sencillo que en la mayor parte de los casos puede hacerse con una simple hoja electrónica sin tener que pasar la Regla por la carretera.”

presentan dos perfiles de carreteras que se suponen perfectas en regularidad superficial. Como la superior tiene mucha mayor curvatura, daría un CV mucho mayor que la inferior, pese a tener la misma regularidad. Para evitar esto, la Norma introduce el concepto de “ordenada media” de un tramo (100 m, p.ej.), que define como la media aritmética de las ordenadas del Viágrafo calculadas en el tramo en cuestión.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

9. Cálculo del Coeficiente de Viágrafo.

La Norma NLT 332/87 describe la utilización del Viágrafo y el proceso de obtención del Coeficiente de Viágrafo de un tramo de carretera. Se ha visto más arriba la definición del CV. Para el Viágrafo “A” de registro gráfico que describe la Norma, si se tiene el gráfico de la ordenada del Viágrafo en un tramo, la Norma indica que el CV se obtiene de la forma siguiente: “Se leen los milímetros de perfil registrado que igualan o superan separaciones de la línea media por arriba o por abajo de 5 mm. Luego, los milímetros de perfil, con separaciones de la línea media iguales o superiores a 10 mm, y así sucesivamente para separaciones de 15, 20, 25, etc. La décima parte de la suma de estas lecturas nos da el Coeficiente de Viágrafo CV (para los Viágrafos normales con regis-

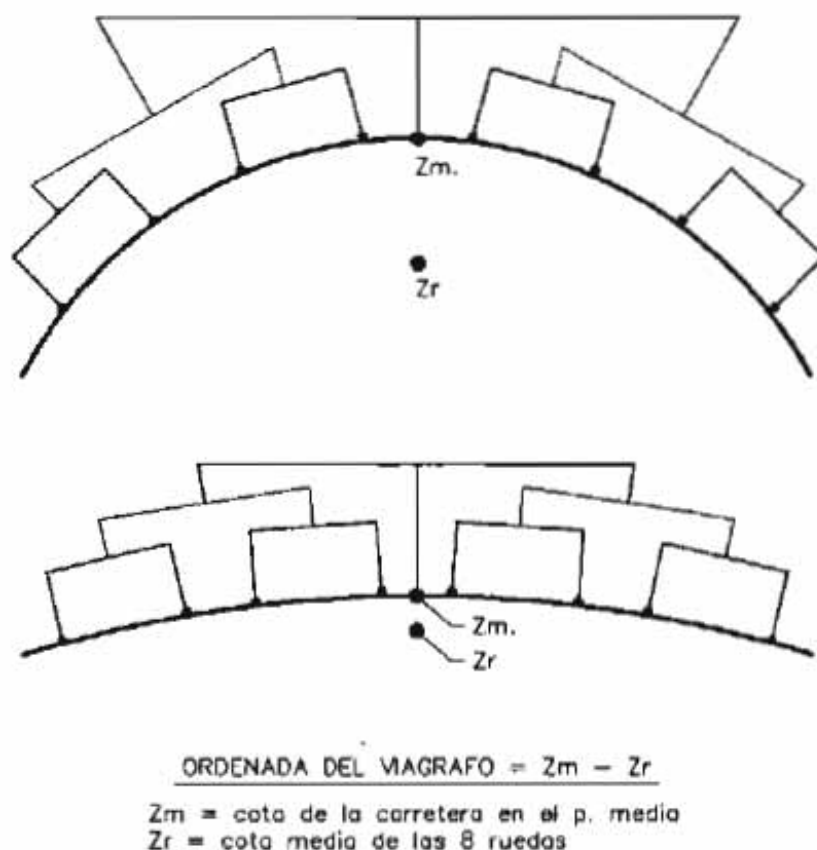


Figura 6. En una carretera con fuerte curvatura en alzado, la ordenada del viágrafo será muy grande aunque la regularidad sea excelente. Por ello se introduce el concepto de “Ordenada Media”.

tro a escala horizontal 1:100”). Entendemos que la figura 7 explica este método de integración gráfico, válido para escala 1:100, pero que puede aplicarse a otras escalas de registro gráfico, si no hay más remedio, cambiando el factor 10 por el correspondiente a la escala. En la figura 7 puede verse que según la Norma, el área se obtiene sumando las longitudes L_i y multiplicando por el incremento vertical entre líneas. Como el área debe calcularse en dm^2 , las longitudes en m a escala 1:100 representan dm si se mi-

den en mm en el gráfico, que es lo que hace la Norma, y el incremento de altura son 5 mm, resulta:

$$\text{Area } S = \Delta y \sum L_i \quad (\Delta y \text{ en mm})$$

$$S = \frac{\Delta y}{100} \sum L_i = \frac{5}{100} \sum L_i \quad (\Delta y \text{ en mm})$$

$$CV = 2S = \frac{10}{100} \sum L_i = \frac{1}{10} \sum L_i$$

Esta forma de cálculo descrita en la Norma ya no tiene mucha

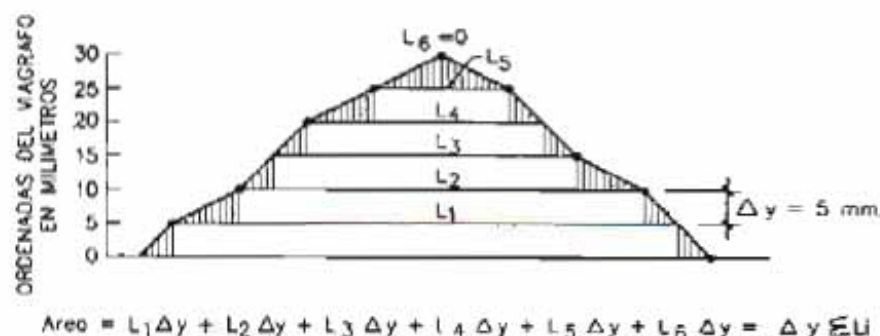


Figura 7. Esquema de integración de la curva de Ordenadas del Viágrafo según nuestra norma actual.

aplicación, porque no creemos que en 1992 nadie vaya a calcular un CV superficiando un perfil y además, de forma tan peregrina. No es fácil de entender por qué se incluye una forma de cálculo como esta en una Norma oficial de 1987, ya que el IBM personal salió al mercado en 1981, y muchos técnicos ya llevábamos varios años antes trabajando con los Apple II, que tenía un coste accesible incluso para un particular de modestos recursos como el autor.

El Viógrafo "B", electrónico y más "moderno" que cita la Norma, calcula el CV por medio de la fórmula

$$CV = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|}{n} \cdot 100$$

siendo \bar{y} la ordenada media:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

Esta fórmula intenta reproducir un algoritmo que calcule el área tal como se ha visto que se hacía a mano sobre el gráfico. Sin duda está pensada con más buena voluntad que acierto, y probablemente, falta indicar que en la sumatoria debe calcularse la parte entera del valor absoluto, como puede verse en F. Ortiz (14). La fórmula parece muy sencilla de interpretar y de aplicar, pero no es así, debido a la "ordenada media". Con el fin de eliminar la influencia de la curvatura vertical de la carretera vista en la fig. 6, se calcula el área no con las ordenadas del Viógrafo obtenidas, sino con la diferencia entre éstas y la ordenada media. En el primer hectómetro medido se supone la línea media igual a 0, ya que no existe valor inicial. Esto se hace situando el medidor del Viógrafo en la mitad de la escala, dándole el valor 128 en la escala 1-255. En este primer hectómetro las ordenadas con las que se calcula el área son por tanto las ordenadas del Viógrafo. En los siguientes hectómetros se corrige la línea media comparando el valor de la ordenada media del hectómetro con el del hectómetro anterior. Lo más importante, y que no dice la Norma, es que si la dife-

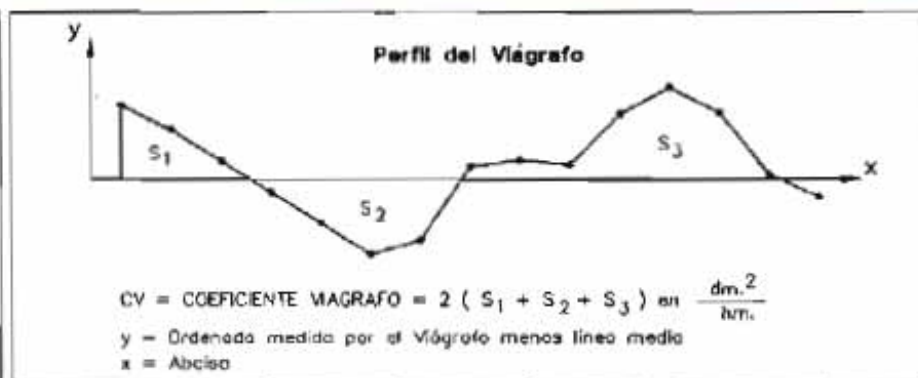


Figura 8. Sería todo mucho más sencillo si el Coeficiente del Viógrafo se obtuviera superficiando la curva de Ordenadas de una forma razonable, en lugar de la forma manual o con un programa que es imposible comprobar como indica la Norma actual NLT 332/87.

rencia es menor de 1.5 mm se sigue con la misma línea media, pero si es mayor o menor de 1.5 mm, corrige la línea media con esa diferencia, y las ordenadas del Viógrafo con las que se calcula el área (y por tanto el Coeficiente CV) quedan reducidas en esa cantidad. Obsérvese que esta modificación de la línea media puede hacer que el Coeficiente de Viógrafo cumpla la norma o no la cumpla (¿por qué no tomar 1.4 mm en lugar de 1.5 en algún caso?) en un tramo, y que por tanto deba ser reparado o no serlo, sin que quien tiene que repararlo sepa cómo se ha calculado el valor que lleva a esa costosa decisión.

Una vez definidas las ordenadas del Viógrafo en un hectómetro con su corrección de la línea media, debe calcularse el Coeficiente de Viógrafo. La definición de la Norma es clara: "el doble del área comprendida entre la línea irregular del perfil obtenido y la línea media, calculada por rectángulos inscritos de 5 mm de altura". Si no se dijera que debe calcularse por rectángulos inscritos, el cálculo sería inmediato por cualquier método numérico de integración, pero esta prescripción complica innecesariamente los algoritmos de cálculo. En la Fig. 8 se indica cómo se calcularía el CV a partir del perfil, y en la Fig. 9 se esquematiza cómo lo calcula realmente el programa de cálculo del Viógrafo "B" del CEDEX, que es el utilizado en España. Ver Fernando Ortiz (14).

El autor opina que, si el Viógrafo va a seguirse utilizando en temas de trascendencia económica tan grande como el decidir si un tramo de carretera debe rectificarse o no, la Norma del CEDEX pre-

cisa de una urgente actualización, ya sugerida por otra parte en (8) y en (5) párrafo 3.2 por R. Crespo. En el momento de escribir estas líneas sólo existe en España el Viógrafo del CEDEX, y el autor cree que hay también menos de 5 personas que sean capaces de explicar con todo detalle cómo se calcula realmente el Coeficiente del Viógrafo, es decir, qué algoritmo tiene programado realmente el Viógrafo "B". Tal vez hubiese sido mejor seguir con la Norma USA ASTM E 1274-88 (11), aunque en ella se tenga el problema de la "blanking band". Disponiendo hoy día en Europa y USA de perfilógrafos láser de 1 lámpara, rápidos y baratos, la normativa actual del Viógrafo y su aplicación nos parece tan obsoleta como si nos obligaran a los técnicos a utilizar las viejas calculadoras Brunswiga de manivela.

En cualquier caso, disponiendo del perfil del Viógrafo, que puede calcularse analíticamente con suma sencillez a partir del perfil longitudinal del tramo, el cálculo del área encerrada por el perfil es muy sencilla, y puede calcularse también analíticamente. Pero para que esta área (el CV) obtenida analíticamente coincida con la calculada por la Norma, el área debe calcularse mal expreso, siguiendo el esquema de la Fig. 8. El programa que aquí se incluye calcula el área de esta forma, de manera que el Coeficiente así obtenido debe coincidir con el obtenido por el equipo "B". Se obvia aquí al amable lector el comentar algunas otras cosas, como el Coeficiente de Viógrafo 2.5 que se incluía en algunos de los informes antiguos, calculando el área por rectángulos

de 2.5 mm de altura en vez de 5 mm, y cuya área no coincide en absoluto, como era lógico prever por la forma de cálculo, con la obtenida por los 5 mm.

10. Algoritmo de cálculo en ordenador.

Si la Norma 332/87 no fuera tan innecesariamente complicada, el algoritmo sería muy sencillo:

a.- El programa calcularía en primer lugar el fichero de ordenadas del Viágrafo con el mismo algoritmo que se describe a continuación. La influencia de la curvatura de la carretera se tendría en cuenta ajustando una parábola a las 8 ruedas del Viágrafo y tomando como ordenada en el punto medio del Viágrafo la cota de la parábola ajustada. El algoritmo de ajuste es sumamente sencillo, y puede verse en (10). Si se desea más longitud de carretera para el ajuste (el Viágrafo sólo mide 9,31 m) pueden tomarse más puntos del perfil longitudinal.

b.- A continuación calcularía el área del perfil del Viágrafo exactamente, como indica la Fig. 8.

c.- El Coeficiente del Viágrafo sería el doble del área así obtenida. Este algoritmo está programado en C, y está a disposición de los lectores interesados.

Sin embargo, la Norma es como es, y en base a ella se decide si debe o no fresarse un hectómetro de carretera. Por ello, el autor se ha visto obligado a programar el algoritmo correspondiente, que es el siguiente:

a.- A partir del perfil longitudinal de la carretera, se calcula el fi-



chero de ordenadas del Viágrafo como sigue:

- Se coloca el principio del Viágrafo en el primer punto leído. Sea éste el punto número 1, que tiene abscisa 0.0. Sea z_1 la cota de la carretera en este punto.

- Se calculan las cotas de la carretera en las otras 7 ruedas, situadas a 1.33 m de distancia una de otra. Como la distancia entre puntos no es divisor exacto de esta longitud, se interpola linealmente entre los dos puntos del perfil longitudinal en que caiga cada rueda. En este programa, la interpolación es lineal, aunque puede hacerse también cuadrática o por splines cúbicos al igual que en la Regla de 3 m.

- Se calcula la media de las 8 cotas anteriores, z_c .

- Se calcula la cota de la carre-

tera en el punto que corresponde a la mitad del Viágrafo, es decir, a 4.655 m del primer punto z_m .

- La ordenada del Viágrafo en ese punto es $z_v = z_m$. Esta ordenada aún no tiene el ajuste de la línea media. Se archiva este valor en un fichero auxiliar.

- Se avanza un intervalo en el perfil longitudinal de la carretera y vuelve a repetirse el proceso.

- Se repite lo anterior hasta que la rueda 8 del Viágrafo llega al final del fichero.

b.- A continuación, se hace el cálculo de la línea media. Para ello, se lee el fichero recién calculado de ordenadas del Viágrafo y se calculan cada 100 m las medias de los valores obtenidos. Se obtiene así un fichero pequeño en que para cada hectómetro se tiene la ordenada media del Viágrafo. A continuación, se calculan las diferencias de cada media con la del hectómetro anterior. Si las diferencias son menores de 1.5 mm, se conserva el valor medio, pero si son superiores se suma algebraicamente esta diferencia a la media del hectómetro.

c.- Se recalcula el fichero de ordenadas del Viágrafo obtenido en (a) sumándole algebraicamente los valores obtenidos en (b) que correspondan a cada punto según el hectómetro donde se encuentre. Este es el fichero con el que van a calcularse las áreas.

d.- Se calculan las áreas en ca-

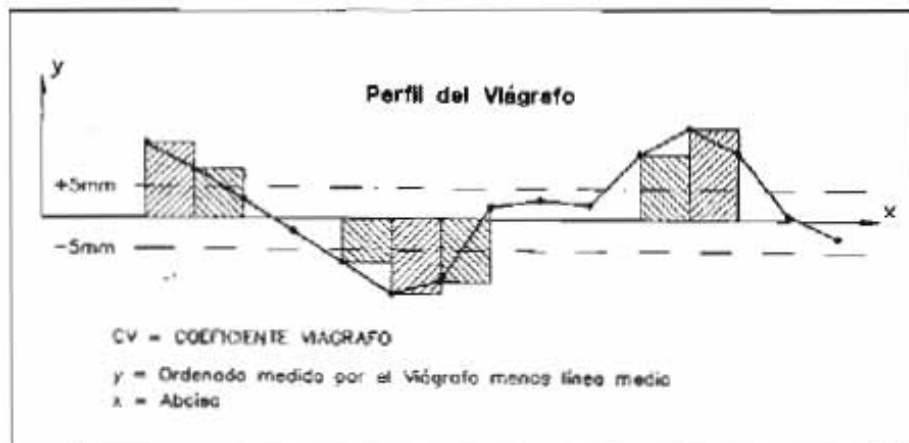
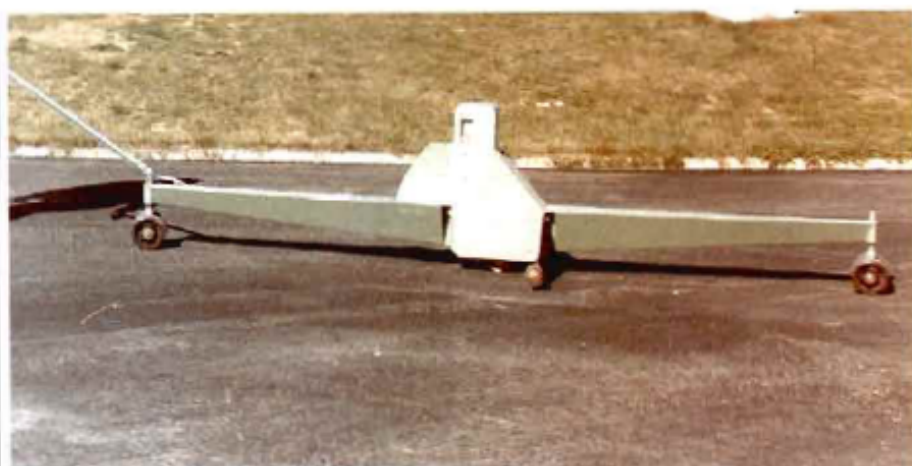


Figura 9. Cálculo del coeficiente CV según el programa del Viágrafo del CEDEX

“**M**edir el IRI en el centro de la calzada, donde no pisan las ruedas, es un truco que cada vez se acepta menos. Ya comienza a pedirse el IRI de cada rodada en cada carril de la carretera.”



Regla de 3 m con "registro gráfico". Es necesario relegar al archivo estos obsoletos equipos.

da hectómetro según el esquema de la Fig. 9, y se calcula el Coeficiente de Viágrafo como el doble de la suma de las áreas de cada hectómetro.

El programa completo de cálculo y dibujo del Viágrafo y su listado están a disposición de los lectores interesados.

11. Comprobación del algoritmo del Viágrafo.

El cálculo de la ordenada del Viágrafo sin corrección de línea media se comprueba también, como la Regla de 3m, por medio de su Función de Respuesta de Frecuencia, que puede verse en R. Crespo (5). Para longitudes de onda iguales a la longitud total del Viágrafo (9,31 m) su ordenada es doble, y resulta una senoide igual al perfil de la carretera pero de doble amplitud. La función de respuesta de frecuencia del Viágrafo puede calcularse con la misma sencillez que la de la Regla de 3m.

12. Cálculo de la ordenada del Viágrafo con hoja electrónica.

El algoritmo del Viágrafo es también un filtro digital sencillo sobre el perfil longitudinal. Puede programarse en la hoja electrónica con el mismo principio que el visto para la Regla de 3m, aunque la media es de 8 ruedas en lugar de 2. Como es muy raro el caso en que la distancia de muestreo sea divisor exacto de 1,33m, en los casos prácticos deberán tomarse los puntos más próximos a las abscisas del

Viágrafo (0, 1.33, 2.66, 3.99, 5.32, 6.65, 7.98 y 9.31), calcular la media de las 8 cotas y restar la cota más próxima a la abscisa mitad del viágrafo (4.655 m). El lector se quedará sorprendido de la exactitud de esta aproximación si dibuja superpuestas en LOTUS las curvas reales (calculadas por el programa) y aproximada con este sistema.

Con la ordenada del Viágrafo ya calculada, el lector puede analizar las distintas formas de calcular el área de la curva, y en consecuencia el CV, y comprobar los resultados que le entregue un tercero.

13. Recomendaciones para antes de reparar un tramo.

Si la medida del IRI de un tramo ha resultado en que el hectómetro debe repararse, se sugieren los análisis siguientes antes de comenzar la reparación:

A.— Comprobar en primer lugar cómo se ha calculado el IRI. Existe un viejo truco que tal vez algunos lectores todavía no conozcan, y que consiste en pasar un equipo mecánico viejo que mida el IRI en el centro de la calzada. En general el IRI así obtenido será mejor que el obtenido en las rodadas de cada carril ya que en el centro de la calzada rara vez apoya ninguna rueda. Pero este truco cada vez da menos resultados, ya que se tiende a pedir el IRI de cada rodada en cada carril, y definir el IRI de un carril por el valor medio de las dos rodadas, que es el IRI que notamos los usuarios de la carretera.

B.— Si el IRI sale mal en un hectómetro, analizar en qué rodada

es, pidiendo el IRI de cada una. En algunos casos, pueden sacarse conclusiones que ayudan a identificar los defectos.

C.— Obtener el perfil longitudinal de la rodada mala cada 12.5 cm. Esto puede hacerse con mira y nivel (coste y plazo prohibitivos), con el DIPSTICK (coste y plazo prohibitivos) o con el Video-Láser RST. Correr el programa dado en (6) con intervalos de cálculo sucesivamente más pequeños, de 50, 25, 10 y 5 metros, hasta identificar las zonas que producen los defectos.

D.— En la zona identificada, correr el programa (6) con intervalos de 25 cm y dibujar (con LOTUS, p.ej.) el perfil de IRI obtenido.

E.— Comprobar el perfil de detalle del IRI con el obtenido por el programa de Regla de 3m aquí descrito para carreteras de hormigón, y con el Perfil del Viágrafo para bituminosas. Puede ocurrir que, aún no cumpliendo el IRI, se cumpla la Regla o el Viágrafo. Si el Viágrafo sale muy justo o no cumple por muy poco, dibujar el perfil del Viágrafo e integrarlo por diversos métodos, incluso gráficos aproximados como dice la Norma. El ajuste de 1.5 mm en la línea media es discutible y no está en la Norma. Tal vez un ajuste de 1.4 mm la haría cumplir.

F.— Simular la reparación modificando las cotas del perfil longitudinal y volviendo a correr los programas citados hasta obtener un IRI, o Regla de 3m, o Viágrafo, que cumpla la norma. Elegir la solución más económica.

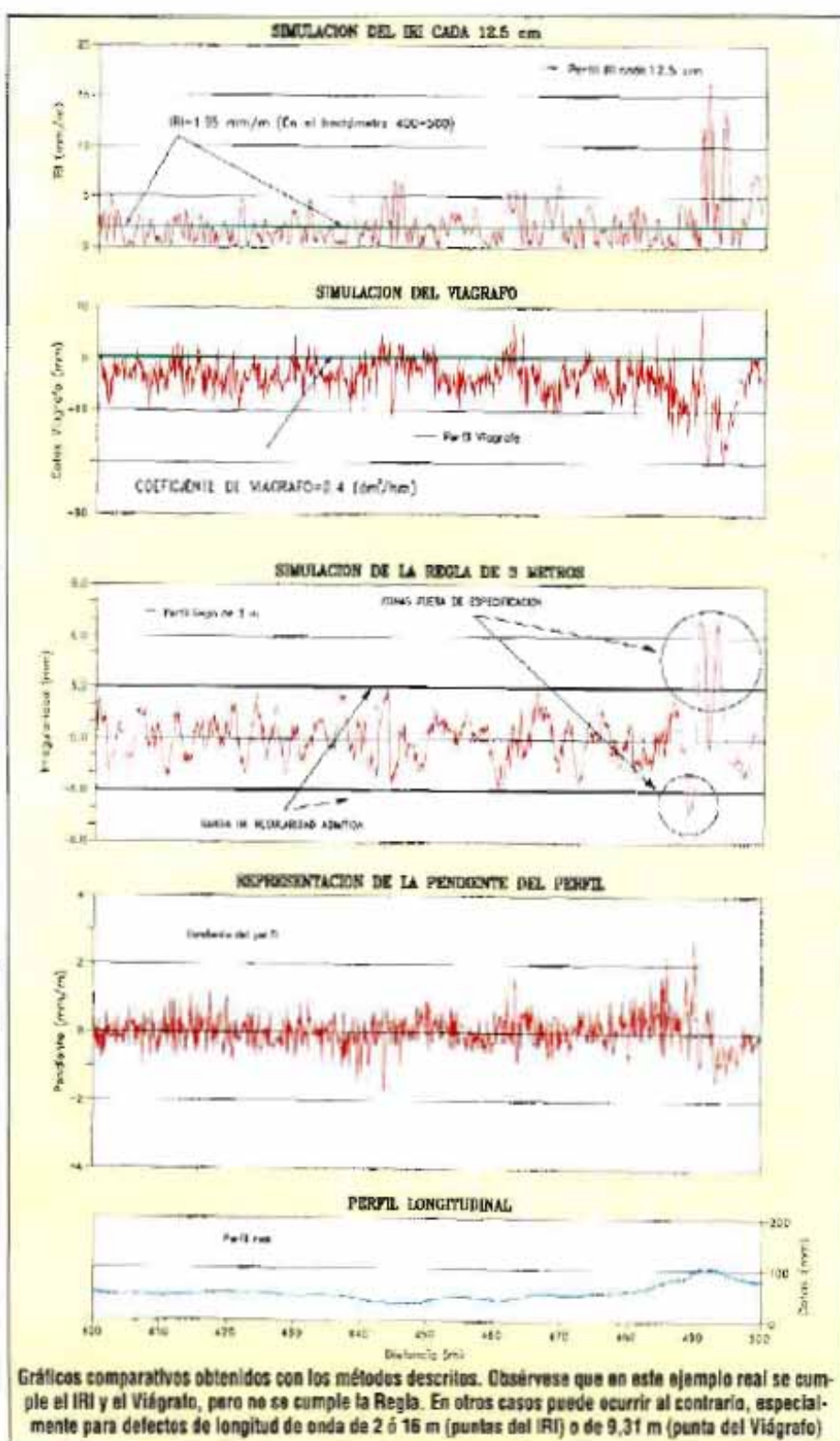
G.— Con estos análisis, se obtendrá un extraordinario detalle del

hectómetro malo, y la longitud de zona a reparar se reducirá mucho, al igual que el coste de la reparación.

H.- Existen análisis adicionales, de los que el más importante es el de longitudes de onda. Efectuando el análisis de Fourier del perfil longitudinal es posible ver qué longitudes de onda son más importantes en los defectos de un tramo (análisis espectral). Los algoritmos y programas correspondientes son objeto de un próximo artículo.

Bibliografía

1. Banco Mundial. Technical Paper 45. "The International Road Roughness Experiment". Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. M.W. Sayers, Thomas D. Gillespie y César A.V. Queiroz, 1986.
2. Laboratorio del Transporte. Norma NLT-334/87. "Medida de la regularidad superficial de un firme mediante la Regla rodante de Tres metros".
3. Banco Mundial. Technical Paper 46. "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements". Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie y William D.O. Paterson, 1986.
4. Ingeniería Civil (Nº 72). "Medida de la Regularidad Superficial. El indicador IRI y el equipo DIPSTICK". Ramón Crespo del Río y S. Pou.
5. Ingeniería Civil (Nº 74). "Evaluaciones de la Regularidad Superficial con Regla de 3 metros, Viógrafo e IRI". Ramón Crespo del Río e I. Sánchez.
6. "Cálculo del IRI a partir del perfil longitudinal de una carretera". Rutas, Nº 30. Mayo 92. Manuel J. Melis.
7. "Solución analítica del IRI para un perfil sinusoidal". Cuadernos AEPO, Nº 1. Ramón Crespo del Río.
8. "Comentarios sobre el método de cálculo del Coeficiente de Viógrafo de perfiles de carretera". Comunicación interna. Ramón Crespo del Río, 1988.
9. "Levantamiento del perfil longitudinal de la carretera con el aparato Viógrafo". Esc. Esp. Ing. Caminos. Laboratorio del Transporte, 1956.
10. "Cálculo numérico. Métodos y



11. "Standard test method for measuring pavement roughness using a Profilograph". ASTM, Diciembre 1988.
12. "Cálculo de Coeficientes de Viógrafo de perfiles sinusoidales". R. Crespo. Comunicación interna, 1988.

13. Laboratorio del Transporte. Norma NLT-332/87. "Medida de la regularidad superficial de un firme mediante el equipo Viógrafo".
14. "Desarrollo de un sistema de medida y obtención de resultados para el aparato Viógrafo". Fernando Ortiz Prego. Boletín del Lab. Transporte y Mecánica del Suelo. Nº 120. 1977.