

CRITERIOS PARA LA EVALUACION DEL ESTADO DE REGULARIDAD SUPERFICIAL DE UNA CALZADA. PROYECTO DE REGULARIZACIONES

JULIO DEL POZO VELASCO (*)

RESUMEN. La regularidad superficial de la calzada es una calidad que incide en el confort y la seguridad del usuario. Se han efectuado diversos estudios y observaciones correlacionando las frecuencias y amplitudes a que queda sometido el conductor con la pérdida de resolución visual, efectos sobre las vías respiratorias, ritmo cardíaco, etc. Estas observaciones han puesto de manifiesto una incidencia importante entre la regularidad del plano de la carretera y la capacidad de reacción del conductor.

Es necesario, por tanto, analizar el perfil de la calzada estableciendo criterios mediante los cuales se pueda cuantificar el confort de un perfil, obteniendo, de esta forma, un instrumento para establecer umbrales de actuación. Estos criterios servirán además para proyectar las nuevas rasantes en las zonas a regularizar.

ABSTRACT. *The evenness of the road surface is a quality that increases the comfort and safety of the users. Various studies and observations relating frequency and degree to which the driver loses vision have been carried out plus effects on the breathing apparatus, heart beat, etc. These observations have shown important relationship between the regular nature of the road surface and the driver's capacity to react.*

It is therefore necessary to analyze the road profile establishing criteria through which the comfort of a profile can be quantified, thus obtaining a tool for establishing thresholds of action. These criteria will also serve to project new levels in the zones to be regulated.

1. CARACTERIZACION DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE UNA CALZADA

La calzada, en el momento de su puesta en servicio, tiene unas irregularidades propias de la construcción y cuya calificación se recoge en el PG.3 a través de la regla de 3 metros. A lo largo del tiempo la calzada no permanece estable sino que bien por asentamiento del cimiento, hinchamientos, cambios de humedad y volumétricos en las capas, obras de fábrica a nivel de calzada, etc., la rasante evoluciona, hasta, en algunos casos, comprometer la seguridad del usuario, el confort, o ambas calidades a la vez.

Es necesario, en esta situación, efectuar una regularización del tramo en cuestión restituyendo el perfil a una calidad de rodadura que se defina como buena. El restituir la rasante de proyecto es, en la mayoría de los casos, una mala solución, excesivamente costosa, y no siempre posible si existen obras de fábrica involucradas en el tramo.

Queda de manifiesto la necesidad de calificar un tramo de calzada en base a unos índices que permiten definir tanto los umbrales de actuación como la calidad que debe tener la calzada una vez regularizada.

El perfil «visto» desde el vehículo puede asociarse a una señal aleatoria cambiando el espacio por el tiempo a través de la velocidad. Se puede, de esta forma, considerar el vehículo como un sistema excitado por una señal aleatoria y aplicar los métodos de análisis espectral.

El perfil de la calzada vendrá determinado por una magnitud, $x(t)$ (altura del punto), en el tiempo. Su función de autocorrelación será:

$$R_x(\tau) = E [x(t) \cdot x(t + \tau)]$$

es decir, el valor medio del producto de las alturas para un desfase de τ segundos. Si $x(t)$ es una señal estacionaria se deduce:

$$R_x(\tau) = \rho\sigma^2 + m$$

(*) Licenciado en Ciencias Físicas. Jefe de la Sección de Proyectos de Autopistas. Concesionaria Española, S. A.

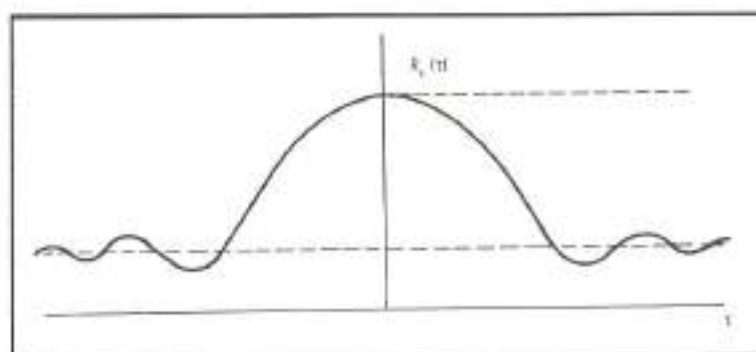


FIGURA 1.

con ρ = coeficiente de correlación; σ = desviación tipo de la señal discretizada (τ) segundos y m la media de la población. La función de autocorrelación es par y tiene la forma de la figura 1.

Es necesario analizar la señal $x(t)$ en el dominio de la frecuencia angular, ω , para lo que habrá que hallar su transformada de Fourier. Sin embargo la función $x(t)$ no cumple las condiciones necesarias para que exista la transformada, es decir:

$$(1) \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (1)$$

En cambio, la función de autocorrelación cumple la condición (1) en cuanto que tiene la propiedad:

$$R_x(\tau \rightarrow \infty) = 0$$

Así pues, se caracteriza el perfil por su función de autocorrelación y se calcula su transformada en Fourier

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

o bien:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega$$

Teniendo en cuenta que si hacemos ($\tau = 0$)

$$R_x(\tau = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega$$

y por la definición fundamental de $R_x(\tau)$

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega$$

queda de manifiesto que el valor cuadrático medio de un proceso aleatorio $x(t)$ viene dado por el área bajo la función $S_x(\omega)$, por lo tanto a esta variable se le llama densidad espectral de potencia y expresa unos valores proporcionales a la energía contenida en la señal para una frecuencia angular (figura 2).

El concepto de densidad espectral es pues una forma rigurosa de caracterizar el perfil de la carretera, pudiendo analizar, incluso, las longitudes de onda que más energía entregan al sistema vehículo.

Las densidades espectrales de la calzada y la recibida por el conductor están relacionadas por

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_x(\omega)$$

en la que $S_y(\omega)$ es la densidad espectral de la señal recibida por el conductor y $H(\omega)$ es la función de transfiencia propia del sistema vehículo

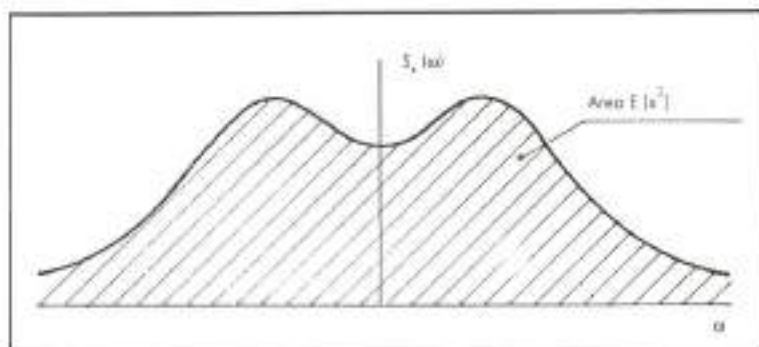


FIGURA 2.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{Y(\omega)}$$

En la práctica no se dispone de una función continua $x(t)$, los aparatos de medida ofrecen una señal discretizada en un intervalo Δt . Esta señal se analiza directamente por tramos, eliminando, de esta forma, la dificultad de la condición (1), hallando la transformada discreta de Fourier y calculando densidades espectrales estimadas.

Si se considera un modelo dinámico de 1/4 de vehículo, tal como el de la figura 3, la función de

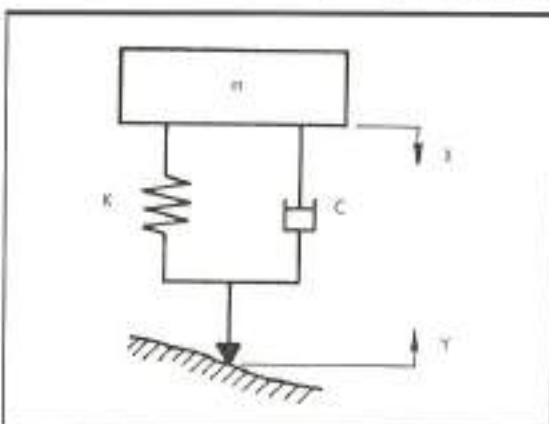


FIGURA 3.

transferencia puede calcularse a partir de la ecuación que rige el movimiento del vehículo

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky$$

La transformada de Laplace de la ecuación diferencial es:

$$(ms^2 + cs + k) X(s) = (cs + k) Y(s)$$

y la función de transferencia:

$$H(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k}$$

En el dominio de la frecuencia angular se puede poner:

$$H(j\omega) = \frac{c j\omega + k}{-m\omega^2 + c j\omega + k}$$

El módulo de $H(j\omega)$ es:

$$|H(j\omega)| = \left| \frac{k^2 + c^2\omega^2 - km\omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} - j \frac{cm\omega^3}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} \right|$$

Otra forma más sencilla de estimar la respuesta en frecuencia de la señal de entrada es utilizar los diagramas de Bode. Teniendo en cuenta que la función de transferencia corresponde a un sistema de segundo orden:

$$H(s) = \frac{\frac{c}{m}s + \frac{k}{m}}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}}$$

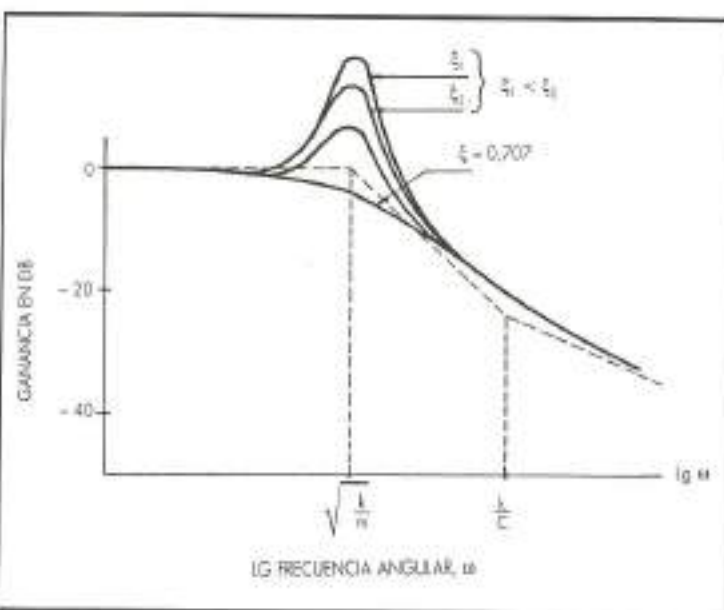


FIGURA 4.

La frecuencia natural no amortiguada es $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ y el coeficiente de amortiguamiento ξ vendrá dado por $\frac{c}{m} = 2\xi\omega_n$. El diagrama de Bode de la función de transferencia será el indicado en la figura 4.

A medida que ξ es más pequeño se produce un pico resonante en la frecuencia ω_n cuyo valor es:

$$M = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

De tal forma que $M = 1$ para $\xi = 0,707$ y $M = \infty$ para $\xi = 0$.

2. FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA 1/4 DE VEHICULO TIPO NORMALIZADO EN EL IRI (INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX)

El vehículo tipo queda definido por el modelo dinámico de la figura 5 con los siguientes parámetros:

$$K_1 = \frac{k_1}{m_2} = 653 \text{ 1/s}^2, \quad C = \frac{c_2}{m_2} = 6 \text{ 1/s}$$

$$K_2 = \frac{k_2}{m_2} = 63,3 \text{ 1/s}^2$$

$$u = \frac{m_1}{m_2} = 0,15$$

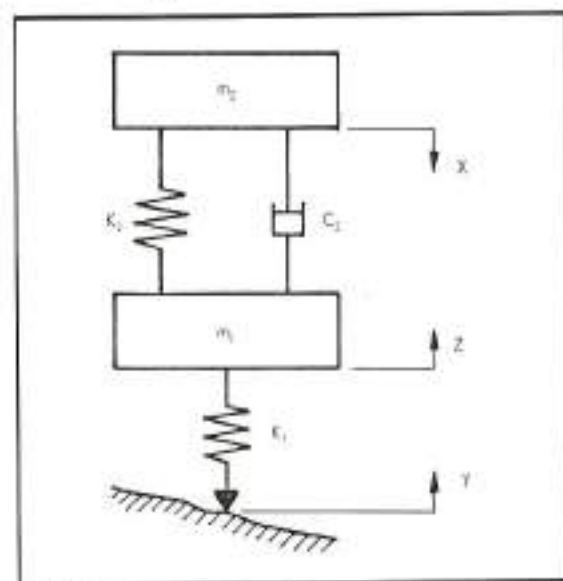


FIGURA 5.

Las ecuaciones dinámicas que describen el sistema son:

$$m_2\ddot{x} + c_2(\dot{x} - \dot{z}) + k_2(x - z) = 0$$

$$m_1\ddot{z} + k_1(z - y) = 0$$

Tomando las transformadas de Laplace de cada ecuación se obtiene:

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{c_2s + k_2}{m_2s^2 + c_2s + k_2}$$

$$\frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{k_1}{m_1s^2 + k_1}$$

La función de transferencia de X respecto a Y es:

$$H(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{k_1(c_2s + k_2)}{(m_2s^2 + c_2s + k_2)(m_1s^2 + k_1)}$$

Aplicando la fórmula a los datos concretos del vehículo tipo:

$$\begin{aligned} m_2 &= 250 \text{ kg} & k_2 &= 15825 \text{ N/m} \\ m_1 &= 37,5 \text{ kg} & c_2 &= 1500 \text{ Ns/m} \\ k_1 &= 163250 \text{ N/m} \end{aligned}$$

$$(\omega_n)_1 = 65,98 \text{ rad/s}; \quad (\omega_n)_2 = 7,95 \text{ rad/s};$$

$$\frac{k_2}{c_2} = 10,55 \text{ rad/s} \Rightarrow \xi = 0,38$$

El diagrama de Bode será tal como indica la figura 6.

Se ha dibujado también la función de transferencia calculada analíticamente. Se observan dos picos resonantes para $(\omega_n)_1$ y $(\omega_n)_2$, el primero producido por los elementos de subíndice 1 del sistema y el segundo por los elementos de subíndice 2.

El efecto amplificador de estos picos tendrá lugar en unas longitudes de onda función de la velocidad del vehículo. La relación entre ambos será la siguiente:

$$L = VT = \frac{2\pi V}{\omega}$$

V (Km/h)	V (m/s)	L ₂ (m)	L ₁ (m)
140	38,9	30,7	3,7
120	33,3	26,3	3,2
100	27,8	22,0	2,6

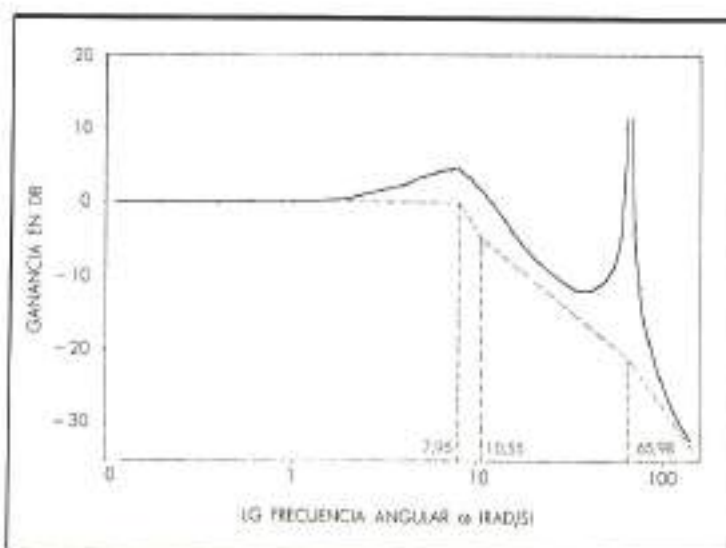


FIGURA 6.

Las amplitudes correspondientes a estas longitudes de onda y las próximas a éstas, serán amplificadas por el vehículo.

3. CRITERIOS PARA CORREGIR LAS DEFORMACIONES EN LA SUPERFICIE DE LA CALZADA

Se supone una rasante deformada que recibe el sistema vehículo y que se asimila a una señal armónica, tal como se indica en la figura 7. Supo-

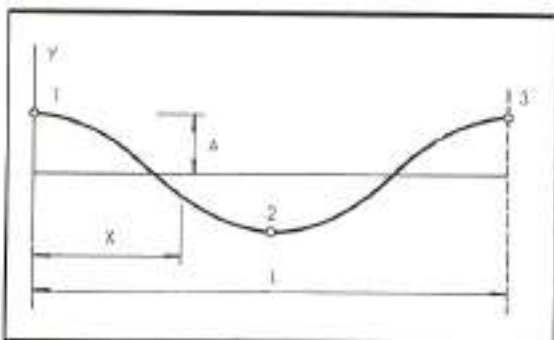


FIGURA 7.

niendo que el vehículo sea un elemento rígido que transmita la señal íntegra, se puede poner:

$$y = A \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

o bien:

$$y = A \cos \frac{2\pi Vt}{L}$$

Para encontrar un criterio que limite la relación de A con L se ha utilizado el de la aceleración vertical a que queda sometido el vehículo.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = - \frac{4A\pi^2 V^2}{L^2} \cos \frac{2\pi Vt}{L}$$

El módulo de la aceleración será máximo para $\cos \frac{2\pi Vt}{L} = \pm 1$, es decir, para $\frac{2\pi Vt}{L} = k\pi$, $k = \{0, \dots, n\} \Rightarrow \frac{Vt}{L} = \frac{k}{2} = \frac{x}{L}$

La aceleración máxima se produce en las crestas y los valles (puntos 1, 2 y 3). El valor de la misma es:

$$\left[\frac{d^2 y}{dt^2} \right]_{\max} = \frac{4A\pi^2 V^2}{L^2}$$

En la figura 8 se expresan las impresiones recibidas por los conductores en función de la amplitud y de la frecuencia de excitación (estudios realizados por Parks). Se toma de esta figura un umbral máximo de aceleración vertical igual a $0,05 \text{ m/s}^2$.

Si se supone que el vehículo circula a 140 km/h .

$$\left[\frac{d^2 y}{dt^2} \right]_{\max} = \frac{4A\pi^2 V^2}{L^2} = 0,5 \text{ m/s}^2 = 59708 \frac{A}{L^2}$$

$$\text{o bien: } L^2 = 119416 A \quad (2)$$

Con esta fórmula se podría calcular la amplitud máxima admisible para una longitud de onda L .

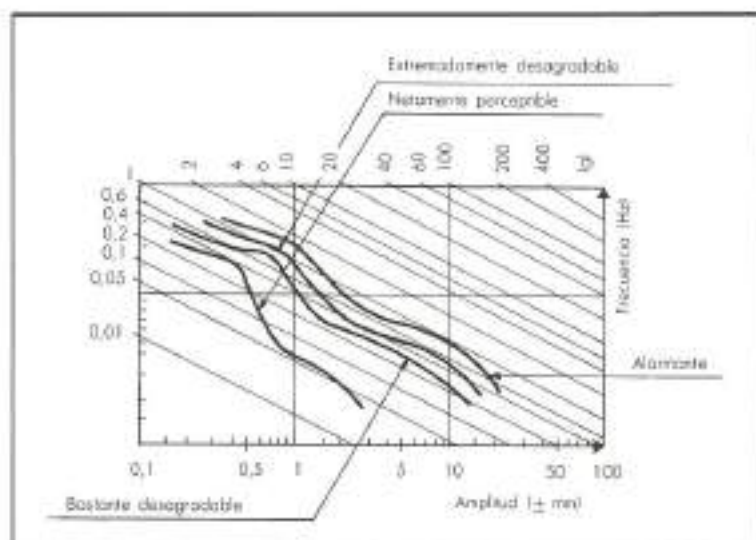


FIGURA 5.

Sin embargo se ha supuesto que el vehículo tiene una función de transferencia $H(\omega) = 1$, es decir, transmite la señal íntegra al conductor.

La función de transferencia del vehículo tipo descrita en el apartado anterior muestra una amortiguación rápida para frecuencias angulares mayores de $(\omega_0)_2$, amortiguación que hay que con-

siderar en la fórmula (2) afectando a la amplitud A de un coeficiente de mayoración.

A continuación se indica en un cuadro, para velocidades de 140 y 100 km/h, los valores máximos de la amplitud, A^* , para distintas longitudes de onda.

Las amplitudes relativas a longitudes cortas

L (m)	ω (rad/s)	$2A$ (cm)	M	G (db)	$2A^*$ (cm)
3	81.64	1.51×10^{-2}	16.84	-24.52	0.25
5	48.98	4.18×10^{-2}	8.17	-18.24	0.34
10	24.49	0.17	4.08	-12.21	0.69
20	12.24	0.70	2.36	-7.49	1.65
30	8.16	1.50	1.18	-1.46	1.78
40	6.12	4.20	1.00	0	4.20

$V = 140$ km/h

M = relación de amplitudes en la amortiguación

G = ganancia en decibelios

L (m)	ω (rad/s)	$2A$ (cm)	M	G (db)	$2A^*$ (cm)
3	58.10	2.95×10^{-2}	9.69	-19.73	0.28
5	34.90	8.20×10^{-2}	5.82	-15.30	0.48
10	17.44	0.33	2.91	-9.27	0.96
20	8.71	1.31	1.20	-1.58	1.57
30	5.81	2.95	1.00	0	2.95
40	4.36	5.25	1.00	0	5.25

$V = 100$ km/h

pueden servir como control de calidad de la superficie construida, por ejemplo:

L (m)	2A* (cm)
3	0,25-0,28
5	0,34-0,48

Condiciones más estrictas que las indicadas en el PG.3.

Finalmente, y basado en los conceptos desarrollados se ha instrumentado un criterio práctico para evaluar el estado de la calzada y para proyectar una rasante en los tramos en los que haya lugar. El fundamento del método es el siguiente:

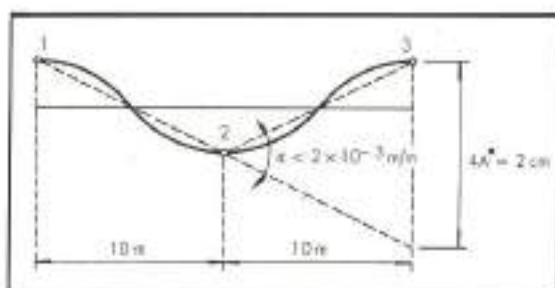


FIGURA 9.

Suponiendo que tres puntos consecutivos queden como en la figura 9, éstos describirían la situación más desfavorable para las ondas de 20 m. Tomando la recta que une los puntos 1 y 2 como referencia, el punto 3 no debería estar a más de 4 amplitudes como (A^*) por encima del nivel de referencia. Este valor, $4A^*$, se ha limitado, contemplando las tablas anteriores a 2 cm. Si el perfil actual de la calzada se describe por una función matemática, este valor, 2×10^{-3} m/m, será la derivada segunda de la función en el punto 2.

Tomando este criterio como referencia, se opera de la siguiente forma:

1. Se nivelan los puntos extremos de la calzada cada 10 m.
2. Se calcula, por tramos, el polinomio de mínimos cuadrados que reproduce suficientemente el perfil actual.
3. Se calcula el valor de a por intervalos, zonificando los tramos de actuación, cuyo valor es mayor del umbral descrito.
4. Se disminuye, en estos tramos, el grado del polinomio hasta que el valor de a quede bajo el umbral.

5. Se eleva la rasante así calculada hasta pasar con un espesor determinado sobre la cresta más alta del tramo.
6. Se unen con parábolas de tercer grado las posibles discontinuidades en las fronteras de los tramos.

De esta forma se habrá proyectado una rasante con el umbral de confort impuesto y con el mínimo de relleno de aglomerado asfáltico.

PERFIL	DIF. COTA INT.	DIF. COTA EXT.	DESVIACION		PERALTE	
			INT.	EXT.	FINAL	PROY.
2500	0,000	0,000	0,00	0,00	7,36	6,00
2510	0,000	0,000	0,00	0,00	7,34	6,00
2520	0,000	0,000	2,00	2,60	7,23	6,00
2530	0,000	0,000	7,00	3,00	7,65	6,00
2540	0,000	0,000	-5,00	-2,20	7,70	6,00
2550	0,000	0,000	-1,80	-0,80	7,62	6,00
2560	0,000	0,000	-1,50	-1,00	7,48	6,00
2570	0,000	0,000	-1,10	0,90	7,08	6,00
2580	0,000	0,000	1,10	-1,70	7,04	6,00
2590	0,000	0,000	-1,80	-2,80	7,13	6,00
2600	0,000	0,000	-0,90	1,30	6,94	6,00
2610	0,000	0,000	1,00	-0,10	6,88	6,00
2620	0,000	0,000	-4,00	-3,60	6,78	6,00
2630	0,000	0,000	1,00	0,30	6,77	6,00
2640	0,000	0,000	1,40	1,30	6,77	6,00
2650	0,000	0,000	2,20	2,80	6,69	6,00
2660	0,000	0,000	2,40	1,30	6,75	6,00
2670	0,000	0,000	-1,70	0,30	6,56	6,00
2680	0,000	0,000	0,80	4,20	5,92	6,00
2690	0,000	0,000	8,50	1,70	6,17	6,00
2700	0,000	0,000	-0,60	2,60	6,00	6,00
2710	0,000	0,000	0,60	0,00	5,91	6,00
2720	0,000	0,000	-1,20	-3,50	6,12	6,00
2730	0,000	0,000	-4,40	-3,50	6,21	6,00
2740	0,000	0,000	-0,60	-1,20	6,38	6,00
2750	0,000	0,000	0,50	2,60	6,27	6,00
2760	0,000	0,000	-1,50	-0,70	6,06	6,00
2770	0,000	0,000	0,00	1,00	5,73	6,00
2780	0,000	0,000	2,20	-0,70	5,77	6,00
2790	0,000	0,000	-1,30	-1,90	5,88	6,00
2800	0,000	0,000	0,70	2,90	5,71	6,00
2810	0,000	0,000	-11,60	3,00	3,65	6,00
2820	0,000	0,000	23,00	-1,30	4,74	6,00
2830	0,000	0,000	-11,90	-2,30	4,58	5,63
2840	0,000	0,000	0,20	1,60	4,25	5,25
2850	0,000	0,000	1,60	1,00	3,99	4,88
2860	0,000	0,000	-0,60	0,20	3,62	4,50
2870	0,000	0,000	-1,30	-1,30	3,26	4,13
2880	0,000	0,000	0,50	1,80	2,73	3,75
2890	0,000	0,000	-1,30	-3,80	2,52	3,38
2900	0,000	0,000	0,60	2,30	2,09	3,00
2910	0,000	0,000	2,30	0,70	1,67	2,63
2920	0,000	0,000	-1,20	0,00	1,49	2,25
2930	0,000	0,000	-0,60	0,70	0,95	1,88
2940	0,000	0,000	2,40	-0,90	0,83	1,50
2950	0,000	0,000	-2,70	1,00	0,23	1,13
2960	0,000	0,000	0,10	-0,30	-0,31	0,75
2970	0,000	0,000	0,80	-2,20	-0,47	0,38
2980	0,000	0,000	-0,80	1,30	-0,90	0,00
2990	0,000	0,000	1,80	-0,50	-1,03	-0,24
3000	0,000	0,000	-2,90	-2,50	-1,21	-0,48

TABLA 1.

Estas operaciones se han programado en ordenador. Como ejemplo, en la tabla 1 se muestra una salida del perfil de la calzada tal y como estaba antes de la regularización. En ésta pueden observarse los altos valores de expresados en cm/10 m (se ha denominado «desviación»).

En la tabla 2 se muestra la rasante trazada en cada extremo de la calzada con los espesores de regularización en cada borde, y los nuevos valores de α , todos bajo el umbral ± 2 cm/10 m.

Por último, en la figura 10, pueden observarse las rasantes actuales y proyectadas, siendo estas últimas, dos líneas irregulares que adaptándose al máximo a la rasante actual cumplen con las condiciones impuestas de confort.

PERFIL	DIF. COTA INT.	DIF. COTA EXT.	DESVIACION		PERALTE	
			INT.	EXT.	FINAL	PROY.
2500	21,352	28,462	0,00	0,00	6,70	6,00
2510	22,649	27,559	0,00	0,00	6,70	6,00
2520	20,624	24,734	0,68	0,68	6,70	6,00
2530	12,031	19,341	0,43	0,43	6,70	6,00
2540	9,204	16,330	0,77	0,18	6,78	6,00
2550	9,257	14,057	1,08	-0,06	7,00	6,00
2560	8,744	12,444	-1,97	-0,34	7,00	6,00
2570	8,526	9,126	-0,81	-0,80	7,00	6,00
2580	6,696	6,996	-0,51	-0,51	7,00	6,00
2590	4,420	7,420	-0,25	-0,25	7,00	6,00
2600	7,037	6,537	-0,01	-0,01	7,00	6,00
2610	8,855	5,955	0,20	0,20	7,00	6,00
2620	10,018	9,356	-0,65	0,38	6,87	6,00
2630	12,899	12,995	0,72	0,54	6,75	6,00

2640	15,042	15,997	0,66	0,66	6,64	6,00
2650	15,768	16,959	0,78	0,76	6,53	6,00
2660	14,967	17,452	0,87	0,83	6,43	6,00
2670	16,808	18,515	0,94	0,87	6,34	6,00
2680	18,828	19,265	0,98	0,89	6,25	6,00
2690	13,340	13,186	0,99	0,87	6,19	6,00
2700	9,429	8,335	0,98	0,83	6,14	6,00
2710	5,712	4,242	0,79	0,76	6,10	6,00
2720	4,179	4,309	0,98	0,66	6,10	6,00
2730	5,910	6,740	-1,14	-1,14	6,10	6,00
2740	6,936	9,066	-1,31	-1,31	6,10	6,00
2750	6,605	7,935	-0,86	-0,86	6,10	6,00
2760	7,366	7,096	-0,41	-0,41	6,10	6,00
2770	7,905	5,298	-0,22	0,04	6,07	6,00
2780	5,650	4,689	-0,59	0,49	5,89	6,00
2790	4,894	6,821	0,20	0,84	5,63	6,00
2800	4,000	6,836	0,56	0,78	5,35	6,00
2810	15,375	4,550	0,67	0,70	5,06	6,00
2820	4,338	4,067	0,59	0,50	4,78	6,00
2830	5,592	6,155	0,39	0,27	4,51	5,63
2840	6,787	6,711	0,14	0,07	4,26	5,25
2850	6,283	6,187	-0,10	-0,08	4,00	4,88
2860	6,107	5,315	-0,27	-0,15	3,73	4,50
2870	6,877	5,598	-0,35	-0,14	3,43	4,13
2880	6,817	4,000	-0,33	-0,08	3,09	3,75
2890	7,840	6,224	-0,22	0,02	2,73	3,38
2900	8,222	6,284	-0,04	0,14	2,34	3,00
2910	6,453	5,880	0,15	0,24	1,94	2,63
2920	6,182	5,765	0,30	0,29	1,55	2,25
2930	6,864	5,229	0,35	0,28	1,16	1,88
2940	5,427	5,786	0,28	0,19	0,78	1,50
2950	6,764	5,372	0,07	0,03	0,41	1,13
2960	7,769	5,057	-0,23	-0,20	0,04	0,75
2970	7,455	6,483	-0,52	-0,46	-0,34	0,38
2980	7,342	5,911	-0,60	-0,70	-0,71	0,00
2990	5,099	5,466	-0,33	-0,37	-1,07	-0,24
3000	5,508	7,180	-0,25	-0,34	-1,42	-0,48

TABLA 2.

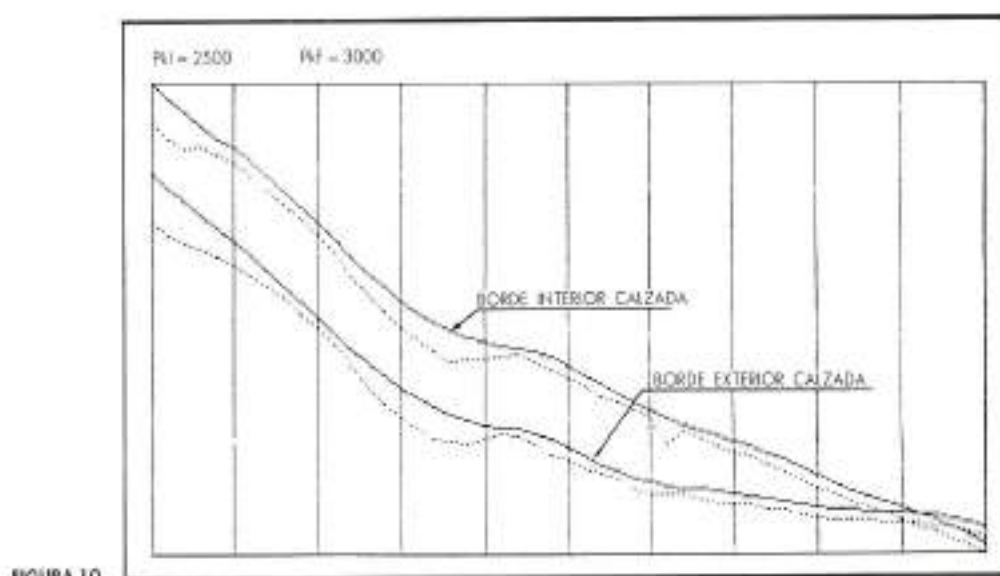


FIGURA 10.