

Cálculo del índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma define el procedimiento que debe seguirse para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en un tramo de carretera de perfil longitudinal conocido.

El IRI es un valor promedio sobre una longitud L. Los valores del IRI dependen del valor elegido para L. Para el cálculo normalizado de los valores del IRI se utilizará como longitud L el hectómetro.

El IRI se puede emplear en Sistemas de Gestión de Firmes para la conservación de pavimentos, en donde se evalúa la regularidad superficial de grandes redes de carretera; o como elemento de control de calidad de la regularidad superficial de obras de pavimentación.

El método que se describe a continuación tiene aplicación cuando se conocen los perfiles longitudinales de la carretera definidos por sus cotas a intervalos de longitud constante.

2 DEFINICIÓN

Para definir el IRI se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y masas de la cuarta parte de un vehículo tipificado que circula a 80 km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar.

Los parámetros que definen las masas, rigideces y amortiguaciones de este vehículo, se presentan en la figura 1.

Para calcular el IRI es necesario conocer el perfil longitudinal de la carretera definido por sus cotas en intervalos, Δx , de longitud constante. El intervalo de medida no será inferior a 10 mm ni superior a 300 mm. Si el intervalo fuese inferior a 250 mm, para que represente el acoplamiento que realmente sufriría la rueda sobre el pavimento, se debe suavizar obteniendo su media móvil por segmentos de 250 mm.

Siendo "u" y "v" los desplazamientos verticales de las masas no suspendida y suspendida respectivamente, con relación a su posición inicial, se define el IRI como sigue:

$$IRI = \frac{1}{L} \sum |\Delta u - \Delta v| \quad [1]$$

donde L es la longitud de valoración del IRI (en todo lo que sigue se considera L = 100 m). Se puede, por tanto, definir el IRI como el desplazamiento acumulado en valor absoluto de la masa superior respecto a la inferior, dividido por la distancia recorrida.

Siendo Δx el intervalo fijado y "n" el número de intervalos recorridos, se tiene:

$$L = n \Delta x$$

Si se define:

$$RS = \left| \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \quad [2]$$

Se obtiene sustituyendo en [1]:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum RS \quad [3]$$

El IRI es una unidad adimensional como se deduce de [1]. Sin embargo, para facilitar su manejo y evitar números decimales extremadamente pequeños, se multiplicará por 1000 y se expresará en dm/hm.

3 FUNDAMENTO Y CÁLCULO

Las ecuaciones diferenciales que expresan el movimiento de las masas suspendida y no suspendida son:

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{v} + c_2 (\dot{v} - \dot{u}) + k_2 (v - u) &= 0 \\ m_2 \ddot{v} + m_1 \ddot{u} + k_1 (u - y) &= 0 \end{aligned} \quad [4]$$

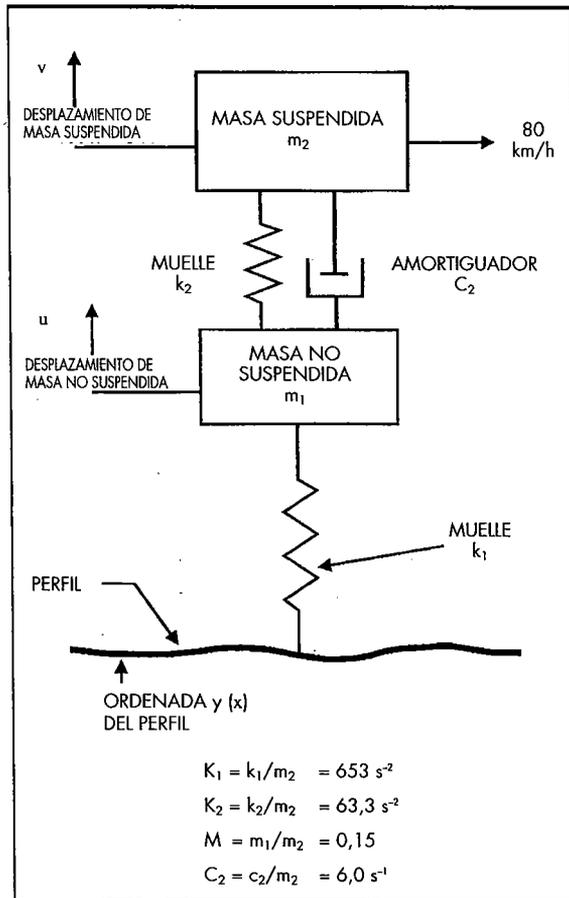


FIGURA 1.

siendo m_1 , m_2 , k_1 , k_2 y c_2 las constantes del cuarto de coche de la figura 1, e "y" es la cota del perfil recorrido, según la experimenta la rueda del vehículo (perfil suavizado).

Las derivadas \dot{u} , \dot{v} , \ddot{u} y \ddot{v} lo son respecto al tiempo.

Si el perfil se define por una serie de cotas a intervalos de longitud constante, una vez resuelto el sistema de ecuaciones diferenciales anterior, los movimientos de las masas del cuarto de coche quedan definidos mediante el siguiente sistema de ecuaciones recurrentes:

$$\begin{aligned}
 Z_{1,i} &= S_{11} Z_{1,i-1} + S_{12} Z_{2,i-1} + S_{13} Z_{3,i-1} + S_{14} Z_{4,i-1} + P_1 \cdot y' \\
 Z_{2,i} &= S_{21} Z_{1,i-1} + S_{22} Z_{2,i-1} + S_{23} Z_{3,i-1} + S_{24} Z_{4,i-1} + P_2 \cdot y' \\
 Z_{3,i} &= S_{31} Z_{1,i-1} + S_{32} Z_{2,i-1} + S_{33} Z_{3,i-1} + S_{34} Z_{4,i-1} + P_3 \cdot y' \\
 Z_{4,i} &= S_{41} Z_{1,i-1} + S_{42} Z_{2,i-1} + S_{43} Z_{3,i-1} + S_{44} Z_{4,i-1} + P_4 \cdot y'
 \end{aligned} \quad [5]$$

Donde :

$$\begin{aligned}
 Z_{1,i} &= \Delta v / \Delta x \text{ para una posición } i, \\
 Z_{3,i} &= \Delta u / \Delta x \text{ para una posición } i, \\
 y' &= (y_i - y_{i-1}) / \Delta x
 \end{aligned}$$

S_{ij} y P_i son constantes que vienen fijadas por el tiempo necesario para que el cuarto de coche recorra el intervalo Δx a la velocidad de 80 km/h. Sus valores figuran al final del programa de ordenador incluido en el apartado 7 de esta norma.

Mediante este sistema de ecuaciones recurrentes, se conoce en cualquier punto las posiciones "u" y "v" de las masas del cuarto de coche, si se conoce la posición de las masas en el punto anterior.

Si no se conocen las condiciones iniciales del sistema se tomarán las siguientes:

$$\begin{aligned}
 Z_{1,0} &= Z_{3,0} = (y^* - y_0) / 11 \\
 Z_{2,0} &= Z_{4,0} = 0
 \end{aligned} \quad [6]$$

Siendo y^* la cota del punto del perfil situado a 11 m del inicio y y_0 la cota inicial (punto $i = 0$).

Conocidas las condiciones iniciales, se puede calcular para cada punto, i , del perfil, su correspondiente valor RS_i .

$$RS_i = |Z_{3,i} - Z_{1,i}| \quad [7]$$

4 CÁLCULO DEL IRI EN UN HECTÓMETRO

Conocidos los valores RS_i de un tramo de carretera, el valor del IRI de un hectómetro cualquiera sería:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum RS_i \quad [8]$$

en el que $n = 100/\Delta x$.

En el apartado 7 se incluye el listado de un programa que permite el cálculo del IRI. No obstante, podrían utilizarse otros programas de cálculo, siempre que los resultados que den no difieran de los obtenidos con el programa del apartado 7 en más de 0,05 dm/hm.

5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En cada hectómetro se dará la abscisa de su punto inicial y, a continuación, el resultado del IRI expresado en dm/hm con aproximación de 1 décima.

Nota. Al ensayar un tramo de carretera se dividirá éste en hectómetros, iniciando una nueva división en cada uno de los hitos kilométricos.

Si la distancia entre hitos kilométricos es diferente de 1000 m, por lo que entre cada dos hitos existe un número entero de hectómetros y un tramo sobrante de longitud inferior a 100 m, pueden ocurrir dos casos, según que la longitud de este tramo sobrante sea:

a) Menor de 50 m.

En este caso el tramo sobrante se añadirá al hectómetro inmediato anterior, y se calculará el IRI del tramo total tal como se indica en la nota del apartado 7. Además del valor del IRI, al dar el resultado se indicará la longitud del tramo.

b) Mayor o igual a 50 m.

En este caso se calculará el IRI del tramo sobrante tal como indica la nota del apartado 7; y, al expresar el resultado, junto con el valor del IRI se indicará la longitud de este tramo.

Cuando se trate de calcular los porcentajes de tramos hectométricos cuyos valores de IRI son inferiores a ciertos umbrales dados, los tramos de los casos a) y b), se ponderarán con un factor igual a su longitud, expresada en metros, dividida por 100.

6 REFERENCIAS

WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 45 - The International Road Roughness Experiment. Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements.

WORLD BANK TECHNICAL PAPER NUMBER 46 - Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements.

7 ANEJO

Cálculo del IRI en un hectómetro

Para facilitar el cálculo del IRI en un perfil de 100 metros de longitud, definido por sus cotas cada Δx , se incluye un programa escrito en lenguaje BASIC.

Al comienzo, el programa solicita el "NOMBRE DEL ARCHIVO CON LAS COTAS (en mm)". Hay que dar el nombre del archivo, que estará constituido por una columna con las cotas del perfil cada Δx , expresadas en milímetros.

A continuación, el programa pide el "INTERVALO ENTRE PUNTOS DEL PERFIL (en m)". Hay que dar el intervalo Δx expresado en metros.

El IRI del hectómetro es el resultado que aparece en pantalla.

Nota. Si se desea calcular el IRI en una longitud distinta a la de 100 m, bastará sustituir en la línea nº 1480 el valor "100" por "L"; siendo "L" la longitud deseada, expresada en metros.

```
1000 REM ESTE PROGRAMA REALIZA EL
      CALCULO DEL IRI EN UN
      HECTOMETRO
```

```
1010 CLS
```

```
1020 DIM Y(1101),Z(4),Z1(4),S(4,4),P(4)
```

```
1030 LOCATE 12,20 : INPUT "NOMBRE DEL
      ARCHIVO CON LAS COTAS.(en mm)";
      A$
1040 OPEN "I", #1, A$
1050 LOCATE 16,20 : INPUT "INTERVALO
      ENTRE PUNTOS DEL PERFIL (en m)";
      DX
1060 REM ----- Calcular constantes
1070 K = INT (.25 / DX + .5) + 1
1080 BL = (K - 1) * DX
1090 GOSUB 1520
1100 REM ----- Inicializar variables
1110 NN = 11 / DX + 1
1120 FOR I = 1 TO NN
1130 INPUT #1, Y(I)
1140 NEXT I
1150 CLOSE #1
1160 OPEN "I", #1, A$
1170 INPUT #1, Y(1)
1180 Z1(1) = (Y(NN) - Y(1)) / 11
1190 Z1(2) = 0
1200 Z1(3) = Z1(1)
1210 Z1(4) = 0
1220 RS = 0
1230 IX = 1
1240 I = 0
1250 REM ----- Introducir cotas
1260 I = I + 1

1270 IX = IX + 1
1280 IF EOF(1) GOTO 1500
1290 INPUT #1, Y(K)
1300 REM ----- Cálculo de las pendientes
1310 IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320 IF IX < K THEN GOTO 1270
1330 YP = (Y(K) - Y(1)) / BL
1340 FOR J = 2 TO K
1350 Y(J-1) = Y(J)
1360 NEXT J
1370 REM ----- Simulación de la respuesta
      del vehículo
1380 FOR J = 1 TO 4
1390 Z(J) = P(J) * YP
1400 FOR JJ = 1 TO 4
1410 Z(J) = Z(J) + S(J,JJ) * Z1(JJ)
1420 NEXT JJ
1430 NEXT J
1440 FOR J = 1 TO 4
1450 Z1(J) = Z(J)
1460 NEXT J
1470 RS = RS + ABS (Z(3) - Z(1))
1480 IF IX < INT (100 / DX + .5) OR IX = INT
      (100 / DX + .5) GOTO 1260
1490 LOCATE 12,30 : PRINT "IRI = ";RS / I
1500 CLOSE #1
1510 END
1520 REM ----- Subrutina para cálculo de
      las constantes
```

```

1530 CLS
1540 N = 4
1550 K1 = 653
1560 K2 = 63.3
1570 MU = .15
1580 C = 6
1590 DIM A(4,4), A1(4,4), A2(4,4), IC(4), JC(4),
      W(4)
1600 MM = DX * 1000
1610 V = 80
1620 T = MM / V * .0036
1630 FOR I = 1 TO 4
1640   FOR J = 1 TO 4
1650     A(J,I) = 0
1660     A1(J,I) = 0
1670     S(I,J) = 0
1680   NEXT J
1690   A1(I,I) = 1
1700   S(I,I) = 1
1710 NEXT I
1720 A(1,2) = 1
1730 A(3,4) = 1
1740 A(2,1) = - K2
1750 A(2,2) = - C
1760 A(2,3) = K2
1770 A(2,4) = C
1780 A(4,1) = K2 / MU
1790 A(4,2) = C / MU
1800 A(4,3) = - (K1 + K2) / MU
1810 A(4,4) = - C / MU
1820 IT = 0
1830 IT = IT + 1
1840 IS = 1
1850 FOR J = 1 TO N
1860   FOR I = 1 TO N
1870     A2(I,J) = 0
1880     FOR KK = 1 TO N
1890       A2(I,J) = A2(I,J) + A1(I,KK) * A(KK,J)
1900     NEXT KK
1910   NEXT I
1920 NEXT J
1930 FOR J = 1 TO N
1940   FOR I = 1 TO N
1950     A1(I,J) = A2(I,J) * T / IT
1960     IF S(I,J) = S(I,J) + A1(I,J) THEN
1970       GOTO 1990
1980     S(I,J) = S(I,J) + A1(I,J)
1990   NEXT I
2000 NEXT J
2010 IF IS = 0 THEN GOTO 1830
2020 ER = 0
2030 FOR KK = 1 TO N
2040   KD = KK - 1
2050   PV = 0
2060   FOR I = 1 TO N
2070     FOR J = 1 TO N
2080       IF KK = 1 THEN 2140
2090       FOR II = 1 TO KD
2100         FOR JJ = 1 TO KD
2110           F I = IC(II) OR J = JC(JJ) THEN
2120             GOTO 2180
2130           NEXT JJ
2140           NEXT II
2150           IF ABS(A(I,J)) <= ABS(PV)
2160             THEN GOTO 2180
2170           PV = A(I,J)
2180           IC(KK) = I
2190           JC(KK) = J
2200           NEXT J
2210           IF ABS(PV) > ER THEN GOTO 2230
2220           PRINT "PIVOT < ", ER
2230           STOP
2240           II = IC(KK)
2250           JJ = JC(KK)
2260           FOR J = 1 TO N
2270             A(II,J) = A(II,J) / PV
2280             A(II,JJ) = 1 / PV
2290             FOR I = 1 TO N
2300               AA = A(I,JJ)
2310               IF I = II THEN 2360
2320               A(I,JJ) = - AA / PV
2330               FOR J = 1 TO N
2340                 IF J <> JJ THEN A(I,J) =
2350                   A(I,J) - AA * A(II,J)
2360               NEXT J
2370             NEXT I
2380             FOR J = 1 TO N
2390               FOR I = 1 TO N
2400                 W(JC(I)) = A(IC(I),J)
2410               NEXT I
2420               FOR I = 1 TO N
2430                 A(I,J) = W(I)
2440               NEXT I
2450             NEXT J
2460             FOR I = 1 TO N
2470               FOR J = 1 TO N
2480                 W(IC(J)) = A(I,JC(J))
2490               NEXT J
2500               FOR J = 1 TO N
2510                 A(I,J) = W(J)
2520               NEXT J
2530             NEXT I
2540             FOR I = 1 TO N
2550               P(I) = - A(I,4)
2560               FOR J = 1 TO N
2570                 P(I) = P(I) + A(I,J) * S(J,4)
2580               NEXT J
2590               P(I) = P(I) * K1 / MU
2600             NEXT I
2610 RETURN

```