

CÁLCULO DEL ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD (IRI) DE PAVIMENTOS DE CARRETERAS

INV E – 794 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma describe un procedimiento para el cálculo del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en un sector de un hectómetro de carretera, a partir de su perfil longitudinal.
- 1.2** El método tiene aplicación para los perfiles longitudinales definidos por sus cotas a intervalos iguales de longitud inferior a 0.30 m.
- 1.3** Para definir el IRI se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y las masas de una cuarta parte de un vehículo tipificado (cuarto de carro), 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 794 - 1. Para calcular el IRI es necesario conocer el perfil longitudinal de la carretera, definido por sus cotas en intervalos (Δx) de longitud constante.
- 1.4** El IRI es un valor promedio sobre una longitud L y sus valores dependen del valor L elegido. Para el cálculo de los valores del IRI en esta norma se utilizará como longitud L el hectómetro.
- 1.5** Esta norma reemplaza la norma INV E-794-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1** Para los efectos de esta norma, aplican las siguientes definiciones:

- 2.1.1** *Perfil longitudinal de la carretera* – Sucesión de cotas en intervalos de longitud constante, la cual no deberá ser inferior a 0.01 m, ni superior a 0.30 m. Si el intervalo fuese inferior a 0.25 m, para que represente el acoplamiento que realmente sufriría la rueda sobre el pavimento, se debe suavizar obteniendo su media móvil por segmentos de 0.25 m.
- 2.1.2** *Desplazamiento vertical, u* – Desplazamiento vertical de las masas no suspendidas del cuarto de carro, con relación a su posición inicial.

2.1.3 *Desplazamiento vertical, v* – Desplazamiento vertical de las masas suspendidas del cuarto de carro, con relación a su posición inicial.

2.1.4 *Longitud de valoración del IRI, L* – Longitud del tramo en el que se calculará el IRI y se reportará un resultado. Para los cálculos que siguen en esta norma, la longitud se considerará igual a 100 m.

2.1.5 *IRI* – El IRI se define como sigue, a partir de los desplazamientos verticales “u” y “v”:

$$IRI = \frac{1}{L} \diamond \Delta u - \Delta v \quad [794.1]$$

2.1.5.1 Por lo tanto, el IRI se puede definir como el desplazamiento acumulado, en valor absoluto, de la masa superior respecto a la inferior, dividido por la distancia recorrida.

2.1.5.2 Si Δx es el intervalo fijado y “n” el número de intervalos recorridos, se tiene:

$$L = n \Delta x \quad [794.2]$$

2.1.5.3 Sustituyendo la expresión del numeral 2.1.5.2 en la del numeral 2.1.5.1:

$$IRI = \frac{1}{n} \diamond \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad [794.3]$$

2.1.5.4 Si se define:

$$RS = \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad [794.4]$$

2.1.5.5 Se obtiene por sustitución:

$$IRI = \frac{1}{n} \diamond RS \quad [794.5]$$

2.1.5.6 De las fórmulas se deduce que el IRI es una unidad adimensional. Sin embargo, para facilitar su manejo y evitar números decimales muy pequeños, se acostumbra multiplicar por 1000 y expresar en m/km (dm/hm).

3 IMPORTANCIA Y USO

3.1 El IRI se puede emplear en sistemas de gestión para el mantenimiento de pavimentos, donde se hacen evaluaciones a nivel de red; o como elemento de control de calidad de la regularidad superficial de obras de pavimentación.

4 FUNDAMENTO Y CÁLCULO

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

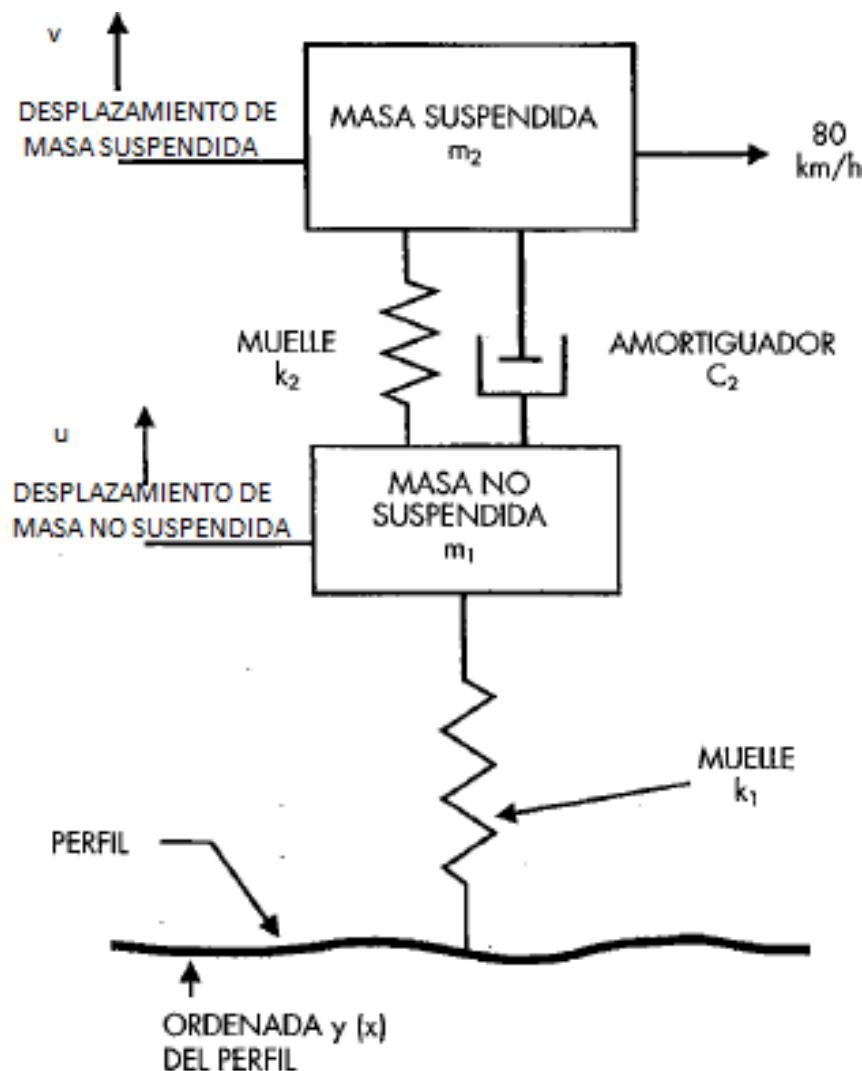
$$m_2\ddot{v} + c_2(v - u) + k_2(v - u) = 0 \quad [794.6]$$

$$m_2\ddot{v} + m_1\ddot{u} + k_2(u - y) = 0 \quad [794.7]$$

Donde: m_1 , m_2 , k_1 , k_2 y c_2 : Constantes del cuarto de carro de la Figura 794 - 1;

y: Cota del perfil recorrido, según la experimenta la rueda del vehículo (perfil suavizado);

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



$$K_1 = k_1/m_2 = 653 \text{ s}^{-2}$$

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

$$M = m_1/m_2 = 0,15$$

$$C_2 = c_2/m_2 = 6,0 \text{ s}^{-1}$$

Figura 794 - 1. Modelo del "Cuarto de Carro"

- 4.2 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 carro quedan definidos mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Z_{1,i} = S_{11}Z_{1,i-1} + S_{12}Z_{2,i-1} + S_{13}Z_{3,i-1} + S_{14}Z_{4,i-1} + P_1 \cdot y^i$$

[794.8]

$$Z_{2,i} = S_{21}Z_{1,i-1} + S_{22}Z_{2,i-1} + S_{23}Z_{3,i-1} + S_{24}Z_{4,i-1} + P_2 \cdot y^i$$

[794.9]

$$Z_{3,i} = S_{31}Z_{1,i-1} + S_{32}Z_{2,i-1} + S_{33}Z_{3,i-1} + S_{34}Z_{4,i-1} + P_3 \cdot y^i$$

[794.10]

$$Z_{4,i} = S_{41}Z_{1,i-1} + S_{42}Z_{2,i-1} + S_{43}Z_{3,i-1} + S_{44}Z_{4,i-1} + P_4 \cdot y^i$$

[794.11]

Donde: Z_{1i} : $\Delta v / \Delta x$ para una posición “i”;

Z_{3i} : $\Delta u / \Delta x$ para una posición “i”;

$$y^i = (y_i - y_{i-1}) / \Delta x$$

[794.12]

S_{ij} , P_i : Constantes que vienen fijadas por el tiempo necesario para que el cuarto de carro recorra el intervalo Δx a la velocidad de 80 km/h. Sus valores aparecen al final del programa de computador incluido en el Anexo A de esta norma.

4.2.1 Mediante este sistema de ecuaciones recurrentes se conocen, en cualquier punto, las posiciones “u” y “v” de las masas del cuarto de carro, si se conoce la posición de las masas en el punto anterior.

4.3 Si no se conocen las condiciones iniciales del sistema en el primer punto, se tomarán las siguientes:

$$Z_{1,0} = Z_{3,0} = (y^* - y_0)/11$$

[794.13]

$$Z_{2,0} = Z_{4,0} = 0$$

[794.14]

Donde: y^* : Cota del punto del perfil situado a 11 m del inicio;

y_0 : Cota inicial (punto $i = 0$).

- 4.4 Conocidas las condiciones iniciales, se puede calcular para cada punto “i” del perfil, su correspondiente valor RS_i :

$$RS_i = |Z_{3,i} - Z_{1,i}|$$

[794.15]

5 CÁLCULO DEL IRI EN UN HECTÓMETRO

- 5.1 Conocidos los valores de RS_i , el valor del IRI en un hectómetro cualquiera sería:

$$IRI = \frac{1}{n} \diamondsuit RS_i$$

[794.16]

$$n = 100 / \Delta x$$

[794.17]

- 5.2 En el Anexo A de esta norma se incluye el código de un programa que permite el cálculo del IRI. No obstante, se podrán utilizar otros programas de cálculo, siempre que los resultados no difieran de los obtenidos en el programa del Anexo A en más de cinco centésimas de decímetro/hectómetro (0.05 dm/hm).

6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 6.1 Los resultados identificarán la abscisa del punto inicial del hectómetro y, a continuación, se presentará el resultado del IRI, expresado en dm/hm, redondeado a la décima.

Nota 1: Al ensayar un tramo de carretera, éste se deberá dividir en hectómetros, iniciando una nueva división en cada uno de los postes de referencia. Si la distancia entre postes de referencia es diferente de 1000 m, por cuanto entre dos postes puede existir un número no entero de hectómetros, pueden ocurrir dos casos, según que la longitud del tramo sobrante sea:

a) Menor de 50 m – En este caso, el tramo sobrante se añadirá al hectómetro inmediatamente anterior, y se calculará el IRI del tramo total. Además del valor del IRI, se debe anotar la longitud del tramo al dar el resultado.

b) Mayor o igual a 50 m – En este caso, se calculará el IRI del tramo sobrante, como se indica en la nota A.1. Además del valor del IRI se debe anotar la longitud del tramo al dar el resultado.

Nota 2: 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, divida por 100.

7 NORMAS DE REFERENCIA

NLT 330 – 98

ANEXO A (Informativo)

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL IRI

- A.1** Para facilitar el cálculo del IRI en un perfil de 100 m de longitud, definido por sus cotas cada Δx , se incluye un programa escrito en lenguaje BASIC.
- A.2** 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 mm. A continuación, el programa pide el “INTERVALO ENTRE PUNTOS DEL PERFIL (en mm)”. Hay que dar el intervalo Δx en metros.
- A.3** El IRI del hectómetro es el resultado que aparece en pantalla.

Nota A.1: Si se desea calcular el IRI en una longitud distinta a 100 m, bastará sustituir en la línea 1480 el valor “100” por “L”; siendo “L” la longitud deseada, expresada en m.

```

1000 REM ESTE PROGRAMA REALIZA EL
      CALCULO DEL IRI EN UN
      HECTÓMETRO
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 "T", #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      IS = 0
2000  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                  NEXT I
2220                  IF ABS (PV) > ER THEN GOTO 2230
2230                  PRINT "PIVOT < ",ER
2240                  STOP
2250                  II = IC(KK)
2260                  JJ = JC(KK)
2270                  FOR J =1 TO N
2280                      A(II,J) = A(II,J) / PV
2290                      NEXT J
2300                      A(II,JJ) = 1 / PV
2310                      FOR I = 1 TO N
2320                          AA = A(I,JJ)
2330                          IF I = II THEN 2360
2340                          A(I,JJ) = - AA / PV
2350                          FOR J =1 TO N
2360                              IF J < > JJ THEN A(I,J) =
2370                                  A(I,J) - AA * A(II,J)
2380                                  NEXT J
2390                                  NEXT I
2400                                  NEXT KK
2410                                  FOR J = 1 TO N
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
```