

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”:

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

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:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\Delta u}{\Delta x} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \quad [794.3]$$

2.1.5.4 Si se define:

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

2.1.5.5 Se obtiene por sustitución:

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

- 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:

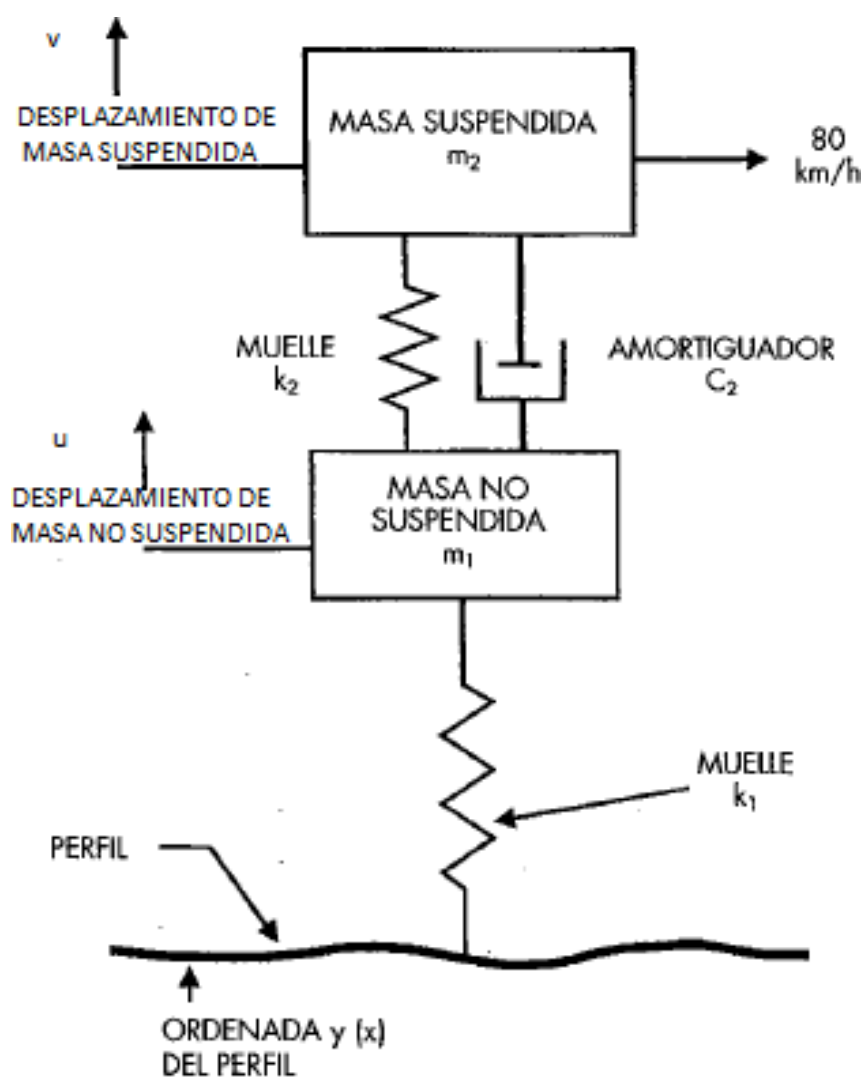
$$m_2 \ddot{v} + c_2(\dot{v} - \dot{u}) + k_2(v - u) = 0 \quad [794.6]$$

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

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} , \dot{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:

$$Z_{1,i} = S_{11}Z_{1,i-1} + S_{12}Z_{2,i-1} + S_{13}Z_{3,i-1} + S_{14}Z_{4,i-1} + P_1 \cdot y' \quad [794.8]$$

$$Z_{2,i} = S_{21}Z_{1,i-1} + S_{22}Z_{2,i-1} + S_{23}Z_{3,i-1} + S_{24}Z_{4,i-1} + P_2 \cdot y' \quad [794.9]$$

$$Z_{3,i} = S_{31}Z_{1,i-1} + S_{32}Z_{2,i-1} + S_{33}Z_{3,i-1} + S_{34}Z_{4,i-1} + P_3 \cdot y' \quad [794.10]$$

$$Z_{4,i} = S_{41}Z_{1,i-1} + S_{42}Z_{2,i-1} + S_{43}Z_{3,i-1} + S_{44}Z_{4,i-1} + P_4 \cdot y' \quad [794.11]$$

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

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

$$y' = (y_i - y_{i-1}) / \Delta x \quad [794.12]$$

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:

$$Z_{1,0} = Z_{3,0} = (y^* - y_0) / 11 \quad [794.13]$$

$$Z_{2,0} = Z_{4,0} = 0 \quad [794.14]$$

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 :

$$RS_i = Z_{3,i} - Z_{1,i} \quad [794.15]$$

5 CÁLCULO DEL IRI EN UN HECTÓMETRO

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

$$IRI = \frac{1}{n} \sum RS_i \quad [794.16]$$

$$n = 100 / \Delta x \quad [794.17]$$

- 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, dividida 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 "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       S(I,J) = S(I,J) + A1(I,J)
1980     IS = 0
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
                GOTO 2180
2120              NEXT JJ
2130          NEXT II
2140          IF ABS (A(I,J)) <= ABS (PV)
                THEN GOTO 2180
2150          PV = A(I,J)
2160          IC(KK) = I
2170          JC(KK) = J
2180          NEXT J
2190      NEXT I
2200      IF ABS (PV) > ER THEN GOTO 2230
2210          PRINT "PIVOT < ",ER
2220          STOP
2230      II = IC(KK)
2240      JJ = JC(KK)
2250      FOR J = 1 TO N
2260          A(II,J) = A(II,J) / PV
2270      NEXT J
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) =
                A(I,J) - AA * A(II,J)
2350          NEXT J
2360      NEXT I
2370  NEXT KK
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
```