

## **El IRI: un indicador de la regularidad superficial**

### **Ignacio Sánchez S.**

Ingeniero de Caminos M.Sc. Ph.D.

Geocisa, Los Alamos de Jerez, 10. Coslada 28820 - Madrid, España.

### **Hernán de Solminihac T.**

Profesor. Departamento Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile,

Casilla 6177, Santiago, Chile

**RESUMEN:** el Índice de Regularidad Internacional (IRI) presenta una escala única de valores para la medida de la regularidad superficial de los caminos, que puede ser utilizada por la gran mayoría de los aparatos de auscultación que existen en la actualidad. Este índice simula la respuesta de un vehículo al circular por una carretera a 80 km/h y por lo tanto permite considerar factores como seguridad, confort y costo de uso de los vehículos. Se recomienda que los valores del IRI se obtengan con perfilómetros dinámicos de gran rendimiento y que se presenten por tramos de 200 m.

## **I. INTRODUCCION**

La regularidad es la característica que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al circular por una carretera. Cabe destacar que la regularidad superficial es mucho más valorada por el conductor que la capacidad portante en sí y que esta última tan sólo le interesa en cuanto incide en la primera por la aparición de baches y otras deformaciones.

Asimismo, el técnico en la administración de carreteras también muestra un especial interés por el estado de la regularidad superficial. Esta repercute en forma importante en los gastos de transporte y mantenimiento de la red vial y, además, proporciona una indicación del estado de una obra recién terminada y puede usarse como índice de calidad en la recepción de carreteras nuevas.

Motivados por estas y otras causas, muchos técnicos e investigadores han desarrollado en los últimos 20 o 30 años una diversidad de aparatos y técnicas para medir la regularidad superficial.

La regularidad superficial es un fenómeno que depende primordialmente del perfil longitudinal de la superficie de la carretera, pero también depende de las características mecánicas de los vehículos y de la velocidad de circulación de éstos.

Existen, principalmente, dos tipos de aparatos de medidas de la regularidad superficial: los que basan su medida en la evaluación del perfil longitudinal y los que captan y miden la respuesta de un vehículo determinado al circular por el tramo de carretera a estudiar. Los datos obtenidos por uno y otro tipo de sistemas son analizados de distintas maneras, dando lugar a una diversidad de índices o notas de la regularidad superficial que complican la comparación del estado de las distintas carreteras.

Con objeto de definir un parámetro universal de medida de la regularidad superficial, que pudiese ser utilizado por los distintos aparatos que existen en la actualidad, se reunió en Brasil un grupo de investigadores de todo el mundo, los cuales definieron el Índice de Regularidad Internacional (IRI International Roughness Index) como unidad de medida de la regularidad superficial de una carretera.

Los objetivos del presente trabajo son repasar fundamentos y características de los sistemas más populares de medida de la regularidad superficial, para a continuación definir y explicar el uso del IRI.

## **II. SISTEMAS DE MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.**

### **2.1 Perfilómetros**

Como se mencionó anteriormente, el parámetro que más influye en la regularidad superficial de una carretera es su perfil longitudinal. Es por esta razón que los primeros aparatos de medida de la uniformidad, y muchos de los que existen en la actualidad, basan sus medidas en la obtención del perfil longitudinal.

El perfil longitudinal de una carretera puede descomponerse en una serie de armónicos (o sinusoides) de distintas amplitudes y longitudes de onda. La gama de longitudes de onda de los armónicos que afectan la regularidad superficial está comprendida entre unos pocos centímetros y varias decenas de metros. Desnivelaciones con longitudes inferiores a estas constituyen la textura superficial de la calzada y las superiores se consideran condicionantes de la topografía de la zona a la geometría del proyecto. Tanto unas como otras son necesarias para el buen funcionamiento de la carretera y no se consideran como irregularidades superficiales. Para que un perfilómetro proporcione una buena indicación de la regularidad superficial, éste debe medir irregularidades con longitudes de onda comprendidas entre 0,5 y 50 m. (1)

Existen dos grupos principales de perfilómetros: los estáticos y los dinámicos. Entre los sistemas estáticos algunos dan perfiles de precisión como los métodos de "mira y nivel" (o topográficos) los de "viga y nivel", el Dipstick, etc.. Otros sistemas estáticos o pseudo-estáticos, aunque no de precisión, son la regla de tres metros, el viógrafo, los perfilómetros tipo CHLOE, y otros.

Los sistemas estáticos de precisión consiguen las medidas más exactas del perfil longitudinal. Sin embargo, su bajo rendimiento y alto costo los hace inadecuados para estudios que no sean muy especiales, como los de investigación, o en países donde la mano de obra sea muy barata. Los métodos pseudo-estáticos no suelen ser mucho más rápidos que los anteriores y además producen medidas que no son muy indicativas del perfil longitudinal.

Entre los perfilómetros dinámicos los más conocidos son los de tipo APL francés (Analyseur de Profil en Long) y los de tipo SDP norteamericano (Surface Dynamics Profilometer). Estos sistemas proporcionan perfiles a gran velocidad, que aunque no son réplica exacta del perfil longitudinal de la carretera (filtran las componentes del perfil con longitudes de onda inferiores y superiores a ciertos valores), si son exactos en la zona de longitudes de onda que influye en la regularidad superficial.

El perfilómetro APL (Figura N° 1) consiste en un remolque especial acoplado a un vehículo rápido, que tiene una rueda tipo motocicleta, un chasis con lastre y un péndulo inercial de baja frecuencia que se considera como referencia fija (2, 3 y 4). El aparato mide el ángulo que forman la rueda-eje del péndulo con el sistema de referencia, el cual se transforma en un desplazamiento vertical mediante una sencilla operación aritmética. El remolque se proyecta para que sea insensible al movimiento del vehículo y sólo sensible al perfil seguido por la rueda palpadora en la gama de frecuencias comprendida entre 0,5 y 20 Hz. La banda de longitudes de onda de operación está comprendida entre 0,3 m (a 20 km/h) y 56 m (a 100 km/h).

Los perfilómetros tipo SDP (antiguamente conocidos como GMR) consisten en un vehículo especial con sensores que miden la aceleración vertical en un punto del vehículo y el desplazamiento relativo de éste punto con respecto al nivel de la carretera (Figura N° 2). Integrando doblemente la señal obtenida por el acelerómetro y sumándosela al desplazamiento relativo obtenido por el otro sensor, se obtiene el perfil longitudinal de la carretera.

Para medir el desplazamiento relativo entre el acelerómetro y la superficie del pavimento se utiliza en la actualidad sistemas basados en rayos láser (K.J. Law 690 DNC, PTI Profiling Vehicle, High Speed Road Monitor, Road Surface Tester, etc.) o sistemas basados en ondas ultrasónicas (KJ Law 8.300, South Dakota Profiling Device, Michigan, Profiling Vehicle, Noss Roughness meter, etc).

El perfil longitudinal en si no es gran indicación del estado regularidad superficial de una carretera. Por eso los distintos sistemas perfilométricos procesan de alguna manera los datos de perfil y obtienen distintas notas, índices o parámetros indicativos del estado de regularidad superficial de la carretera auscultada.

La ventaja principal de los aparatos perfilométricos es la de obtener precisamente el perfil longitudinal, y una vez determinado éste, poder analizar los datos de diferentes modos según sean las exigencias de los distintos organismos.

## 2.2 Sistemas de tipo respuesta RTRRMS

Hoy en día los sistemas más utilizados para medir la regularidad superficial son los conocidos como de respuesta o RTRRMS (Response Type Road Roughness Measuring System). Estos sistemas constan, en general, de tres partes: un vehículo o remolque en el que se realizan las medidas, un sensor que mide movimientos relativos de la suspensión del vehículo o remolque, y un aparato que sirve para visualizar y almacenar las señales registradas por el sensor y al que se le suele designar como el "Monitor". A la parte del sistema compuesta por el sensor y el monitor se la conoce en inglés como el "Road meter" y, en general, se compra por separado del vehículo en el que será utilizado. La medida obtenida por un road meter es, por lo tanto, la respuesta del vehículo al circular por una carretera a una velocidad determinada. Una vez realizada la auscultación de un tramo de carretera, el aparato proporciona un coeficiente que es proporcional a la velocidad vertical relativa media de la suspensión del vehículo en el tramo ensayado. Entre los aparatos más conocidos se encuentran: Mays Meter, Bump Integrator, BPR, ARAN, etc.

La ventaja principal de los sistemas de tipo respuesta es la de proporcionar a gran velocidad un coeficiente que depende del estado de uniformidad de la carretera y confort que experimenta un conductor al circular por dicha carretera.

Existen, sin embargo, ciertos aspectos que desfavorecen el uso de los RTRRMS. Entre estos se incluye:

- el que los coeficientes de uniformidad dependan del tipo de vehículo o remolque y de la posición donde se instala el road meter.
- el que la respuesta dinámica de los vehículos y por tanto los coeficientes de uniformidad dependan fuertemente de la velocidad a la que circula dicho vehículo.
- el que las características mecánicas de los vehículos varíen con el tiempo y por lo tanto para obtener resultados que sean consistentes hay que cuidar minuciosamente el estado de conservación de estos, etc.

En definitiva, aunque los sistemas de tipo respuesta proporcionan un buen coeficiente de medida de la regularidad superficial, la diversidad de modelos y modos de aplicación que existen en la actualidad y sus características mecánicas variables con el tiempo, complican su aplicación como sistemas de referencia de la regularidad superficial.

### III. EL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL

Con el objetivo de unificar los distintos parámetros obtenidos por perfilómetros y RTRRMS, que se utilizan en el mundo para caracterizar la regularidad superficial en forma de notas o índices, se realizó en Brasil, en 1982, el IRRE ( International Road Roughness Experiment), en el que se dieron cita investigadores de distintos países (5, 6 y 7).

El objeto de este experimento, patrocinado por el Banco Mundial, era el de definir un índice de medida de la regularidad superficial que pudiese ser utilizado tanto por perfilómetros como por RTRRMS y que proporcionase una escala única de valores. Además, y para aquellos sistemas en que no se obtuviese un valor exacto del "Índice de Regularidad" (caso de algunos perfilómetros y

todos los RTRRMS), establecer relaciones de correlación entre los índices obtenidos por estos sistemas y los obtenidos por los métodos más exactos.

Los primeros resultados y conclusiones del IRRE se presentaron en el X Congreso Mundial de la IRF (International Road Federation), celebrado en Río de Janeiro en Octubre de 1984 y, posteriormente, en el Congreso Anual del Transportation Research Board (TRB) norteamericano, desarrollado en Washington, D.C., en Enero de 1986.

El resultado de este interés común por obtener una medida universal de la regularidad superficial, ha sido el International Roughness Index (IRI) o Índice de Regularidad Internacional (5, 6, 7 y 8).

#### 3.1 Definición y cálculo del IRI

Para definir el IRI se emplea un modelo matemático que simula la suspensión y masas de un vehículo tipo, circulando por un tramo de carretera a una velocidad determinada. Este modelo se conoce por sus siglas en inglés, QCS (Quater Car Simulation), dado que representa la cuarta parte de un vehículo de cuatro ruedas o un remolque de una sola rueda.

El IRI en un punto de una carretera se define como la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo tipo, dividido por la distancia recorrida por dicho vehículo. El modelo matemático de vehículo que se utiliza es el representado en la Figura N°3. Si se conoce el perfil longitudinal de la carretera,  $y(x)$ , y la velocidad a la que circula el automóvil,  $V$ , se puede calcular en cada punto el movimiento,  $z_1$  y  $z_2$ , de cada una de las masas,  $m_1$  y  $m_2$ , que componen el modelo.

A su vez se puede definir la respuesta del vehículo en términos de la pendiente rectificada, RS (Rectified Slope), en cada uno de los puntos en que se discretiza el perfil longitudinal.

$$RS_i = |z'_1 - z'_2|_i \quad [1]$$

en donde,  $z_1$  y  $z_2$  representan las pendientes de las masas del vehículo en las distintas posiciones,  $i$ , a lo largo del camino de la rueda.

Finalmente, el IRI se obtiene como la media aritmética de la pendiente rectificada a lo largo del camino recorrido. Por lo tanto,

$$IRI = \left[ \sum_{i=1}^n RS_i \right] / n \quad [2]$$

en donde  $n$  es el número de puntos contabilizados.

Es obvio que la respuesta dinámica de un vehículo al circular por una carretera y por tanto el coeficiente IRI, dependen fuertemente de la velocidad de operación del vehículo. Para resolver esta ambigüedad, y después de sopesar las distintas alternativas, los participantes en el IRRE decidieron elegir 80 km/h como la velocidad de referencia para definir el IRI. Esta velocidad fue elegida por considerarse que los coeficientes IRI, que con ella se obtendrían, serían representativos de las sensaciones de seguridad y confort que experimentan los usuarios. Además se estimó que esta velocidad era adecuada para la medición con sistemas de tipo respuesta.

Para el cálculo del IRI es necesario conocer en cada punto de un tramo las pendientes  $z'_1$  y  $z'_2$  de las masas del vehículo tipo. Estas pendientes se obtienen de un modo recursivo, basándose en los valores obtenidos en el punto anterior. De esta forma si se conoce el movimiento del vehículo en un punto  $i-1$ , la respuesta en el punto siguiente puede calcularse por medio de la ecuación:

$$\{Z\}_i = [ST]\{Z\}_{i-1} + y'_i \{PR\} \quad [3]$$

en donde  $\{Z\} = [z'_2, z''_2, z'_1, z''_1]^T$ , con las primas representando derivadas espaciales,  $y'_j = (y_i - y_{i-1})/dx$ , y representa la distancia entre muestras, es constante en cada intervalo,  $dx$ , y  $[ST]$  y  $\{PR\}$  son matrices de  $4 \times 4$  y  $4 \times 1$ , respectivamente, cuyos coeficientes dependen del intervalo de muestra,  $dx$ .

El sistema de ecuaciones [3] puede resolverse para cualquier punto de la carretera, excepto para el primer punto del primer tramo en el que se desconocen los valores de  $z'_i, z'_2, z''_1$  y  $z''_2$  en el punto anterior.

Para inicializar el proceso de cálculo se adopta como valores iniciales del movimiento del vehículo los siguientes:

$$z'1 = z'2 = (y_a - y_1) / 11$$

$$z''1 = z''2 = 0$$

en donde  $y_1$  e  $y_a$  son las elevaciones del primer y a-ésimo puntos correspondientes a distancias de cero y 11 m., respectivamente.  $z'1$  y  $z'2$  representan, por lo tanto, la pendiente media del perfil de carretera en el primer tramo de 11 m. (0.5 seg a 80 km/h).

El procedimiento anterior para el cálculo del IRI es válido para intervalos entre medidas,  $dx$ , comprendidos entre 0.25 y 0.6 m. Para intervalos más pequeños se recomienda suavizar el perfil longitudinal, para así representar mejor la forma en que la rueda de un vehículo cubre el recorrido del tramo. Con este fin, o bien se halla el perfil equivalente cada 0.25 m. (olvidándose de puntos intermedios), o bien se obtiene una media corrida en cada punto con un intervalo de suavización de 0.25 m. En el primer caso, el cálculo del IRI se hace con intervalos de 0.25 m y en el segundo, con el intervalo original pero con el perfil suavizado.

El modelo matemático empleado para el cálculo del IRI actúa como un filtro del perfil longitudinal. Dadas las características de este filtro, éste atenúa las longitudes de onda inferiores a 1 m. y las superiores a 30 m. Por lo tanto, sólo las longitudes de onda comprendidas entre 1 y 30m contribuyen fuertemente al valor que se obtiene del IRI.

### **3.2 Métodos de medida del IRI**

Los diversos sistemas existentes para medir la regularidad superficial se pueden clasificar en cuatro grupos o clases, dependiendo de como la medida afecte al índice IRI.

Clase 1. Perfiles de precisión.

Esta clase representa el más alto grado de exactitud en la medición y cálculo del IRI. Para que un método pertenezca a esta clase requiere una medida de precisión del perfil longitudinal y que sea definido por medio de una serie de elevaciones en puntos separados una pequeña distancia.

En la actualidad, sólo los métodos de "mira y nivel" y los de "viga y nivel" pertenecen a la Clase 1. Estos métodos son apropiados para la convalidación y calibración de otros métodos. Por su bajo rendimiento y excesiva exactitud, comparada con la incertidumbre de la trayectoria recorrida, no se aconseja como adecuados para grandes auscultaciones

Clase 2. Otros métodos perfilométricos.

Este grupo incluye otros métodos que basan el cálculo del IRI en la medida del perfil longitudinal, pero que no tienen la exactitud requerida como para ser considerados como de Clase

1. Esta clase comprende medidas con perfilómetros de alta velocidad y con métodos estáticos que no satisfacen los criterios de precisión y exactitud necesarios para los métodos de la Clase 1.

En la actualidad sólo los perfilómetros del tipo APL tienen convalidada su eficacia en toda la gama de regularidades y longitudes de onda requeridos por el IRI para un sistema de Clase 2. El antiguo perfilómetro inercial GMR ha sido convalidado como de Clase 2, para carreteras con valores del coeficiente IRI inferiores a 3 m/km. Los modernos SDP debieran ser convalidados como Clase 2 para toda la gama de valores.

Los perfilómetros dinámicos incluidos en esta clase son capaces de obtener medidas de gran calidad y a alta velocidad, sin requerir esfuerzos considerables de calibración y mantenimiento de los aparatos.

Clase 3. Estimaciones del IRI mediante correlaciones.

La mayoría de las medidas de la regularidad superficial que se ejecutan en la actualidad, en el mundo, se obtienen con sistemas de tipo respuesta (RTRRMS). Las medidas obtenidas con los aparatos de este tipo dependen fuertemente de las características dinámicas de cada vehículo. Por tanto es necesario transformar las medidas recogidas por estos sistemas para poder obtener coeficientes comparables con el IRI. Así, los valores originales de la pendiente media rectificadora obtenida por los RTRRMS deben ser corregidos y convertidos a la escala IRI, mediante ecuaciones de correlación que se consiguen calibrando experimentalmente cada uno de los aparatos con alguno de los sistemas de las clases 1 ó 2. Además, como las características mecánicas de los vehículos varían muy fácilmente, es necesario mantener controles muy rigurosos tanto en el uso del vehículo como en su mantenimiento. Cuando se observen cambios importantes, todo el sistema compuesto por el road meter y el vehículo deberá ser vuelto a calibrar.

#### Clase 4. Valores subjetivos y medidas sin calibrar

Hay ocasiones en los que, por condicionamientos económicos o de otro tipo, sólo se necesita conocer aproximadamente el estado de la uniformidad superficial de una carretera. A pesar de ello es deseable relacionar la medida de la regularidad superficial a la escala IRI. En estos casos se puede utilizar un aparato tipo respuesta sin calibrar se puede estimar el estado de la carretera o bien se puede valorar este mediante las sensaciones de confort y seguridad que experimenta una persona experta en la materia al circular por la carretera.

La conversión de estas observaciones a la escala IRI, se limita a una equivalencia aproximada que se asocia a unas descripciones estandar del estado de la carretera en función del valor de IRI. Estas medidas u observaciones se consideran de Clase 4.

### **3.3 La escala IRI**

Ya se indicó en los capítulos anteriores que la definición del IRI era la de pendiente rectificadora media del movimiento relativo de las masas de un vehículo tipo, circulando a una velocidad de 80 km/h por un tramo de carretera. La unidad de medida del IRI es por lo tanto la de una pendiente (adimensional). Es recomendable, sin embargo, para no manejar valores muy pequeños, el expresar el IRI en unidades de metros por kilómetro (m/km), milímetros por metro (mm/m) o de pendiente multiplicada por mil.

Es indudable que la longitud de tramo elegida para definir el IRI tiene alguna influencia en el valor numérico de éste. En el IRRE no se establecieron especificaciones al respecto; sin embargo, para evitar problemas de repetitividad, se recomendaron tramos de medidas superiores a 160 m. Teniendo en cuenta esta recomendación y con el fin de definir lo más detalladamente posible la regularidad de una carretera, se piensa que tramos de 200 m son los más apropiados en la definición del IRI.

En la Figura N°4 se muestra la gama aproximada de valores del IRI de los distintos tipos de carreteras, así como las velocidades normales de circulación por dichas carreteras en condiciones de seguridad y confort.

En la Figura N°5 se presenta la relación entre las velocidades típicas, sensaciones durante la conducción y defectos superficiales, y la escala de valores del IRI para una carretera con aglomerado asfáltico o tratamiento superficial. Estas relaciones se pueden utilizar para una estimación subjetiva del IRI (Clase 4).

### 3.4 Precisión de las medidas

La exactitud que se exige a las medidas para la determinación del IRI depende de la regularidad superficial. Así por ejemplo, para los métodos perfilométricos, en los que el cálculo del IRI depende fundamentalmente de la precisión de las medidas del perfil longitudinal y del espaciamiento entre medidas, se requiere que la precisión de las medidas de desnivel cumplan con las siguientes condiciones:

**Clase 1, Precisión (mm)  $< 0.25 \cdot \text{IRI (m/km)}$**

**Clase 2, Precisión (mm)  $\leq 0.50 \cdot \text{IRI (m/km)}$**

Asimismo, el intervalo de medida no deberá ser superior a 25 mm para las medidas de la Clase 1 y a 50 mm para las medidas de Clase 2.

Es de notar que la precisión requerida depende de la regularidad superficial. Aunque esta no se conocerá hasta que se determine el perfil longitudinal de la carretera, con un poco de experiencia es fácil determinar en qué condiciones la precisión podría ser rebajada.

Estos condicionantes son necesarios para las componentes del perfil con longitudes de onda comprendida entre 1 y 30 m y no son necesarios para otras bandas de longitudes de onda.

## IV. CONCLUSIONES

Existen muchos sistemas de medida de la regularidad superficial. Los métodos más populares basan sus medidas en la obtención de un perfil longitudinal o en la respuesta de un vehículo al circular por la carretera a estudiar. Tanto unos sistemas como otros procesan los datos recogidos durante las campañas de auscultación y caracterizan la regularidad superficial mediante una diversidad de índices, notas o parámetros que complican tremendamente la comparación del estado de carreteras auscultadas con distintos aparatos.

Para unificar las medidas de regularidad superficial ha sido establecido, por un grupo de investigadores de todo el mundo, el IRI o Internacional Roughness Index, como unidad universal de medida del movimiento relativo de las masas de un vehículo tipo que circula a 80 km/h por el tramo de carretera a analizar. Se recomienda que el IRI se obtenga en tramos de 200 m y que su valor se exprese en unidades de mm/m o m/km.

Los métodos más exactos de medida del IRI son los perfilométricos estáticos de precisión. Estos métodos son, sin embargo, muy lentos y costosos y por lo tanto de poca utilidad práctica. Las medidas más rentables y a la vez precisas son las obtenidas con perfilómetros dinámicos, como los APL o los SDP. Con estos perfilómetros se pueden auscultar longitudes de hasta 300 km diarios o más. Los sistemas de tipo respuesta también pueden proporcionar valores del IRI a gran velocidad, aunque la precisión obtenida por estos no es tan buena como la conseguida por los perfilómetros dinámicos.

#### REFERENCIAS

1. Descornet, G.: "A criterion for Optimizing Surface Characteristics". Artículo presentado al Congreso del TRB, Washington D.C., Enero, 1989.
2. Saddoul, D.: "Analyseur Dynamique de Profil en Long." Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Chaussées, 37. Marzo-Abril, 1969.
3. Abrache, M.: "Uni des Revêtements Routiers et Confort de l' automobiliste". Bull. Liaison Labo. P. et Chaussées, 71. Mayo- Junio, 1974.
4. Lucas, J. et Viano, A.: "Measure Systématique de l' uni sur le Réseau Rutier. L' APL a Gran Rendement-Version 1978." Bull Liaison Labo. P. et Chaussées, 101. Mayo- Junio, 1979.
5. Sayers, M.W., Gillespie, T.D., and Queiroz, C. A.V.: "The International Road Roughness Experiment: A basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements " Transportation Research record, 1084. Washington, D.C., 1986.
6. Sayers, M.W., Gillespie, T.D., and Queiroz, C.: "The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements". World Bank Technical Paper N°45. Washington, D.C., 1986.
7. Sayers, M.W., Gillespie, T.D., Paterson, D.O.: "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements". World Bank Technical Paper N°46. Washington, D.C., 1986.
8. Paterson, W.D.O.: "International Roughness Index: Relationship to other Measurements of Roughness and Riding Quality ". Transportation Research Record, 1084, Washington D.C., 1986.

#### BIBLIOGRAFIA

9. Haas, R., and Hudson, W. R.: "Pavement Management Systems". Robert E. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1978.

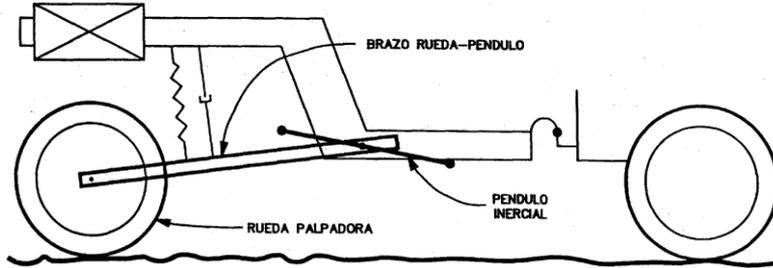
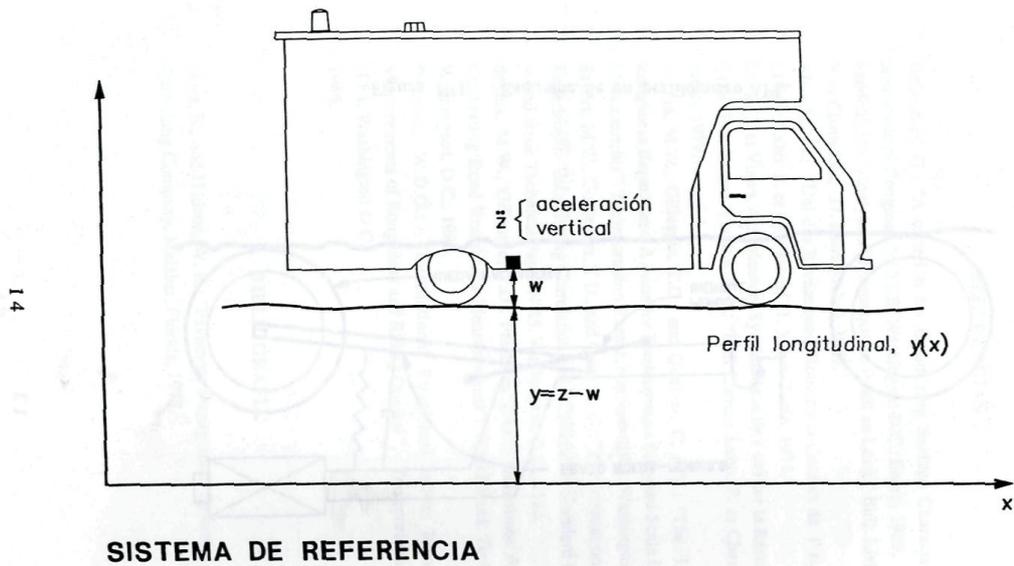


Figura N°1 Esquema de un perfilómetro APL.

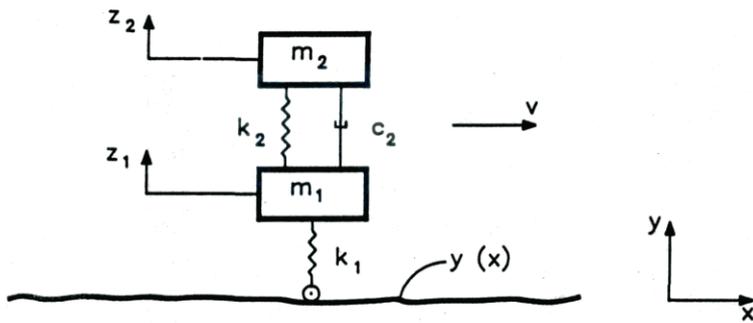
Figura 1. Esquema de un perfilómetro APL



SISTEMA DE REFERENCIA

Figura N°2 Esquema de un perfilómetro SDP.

Figura 2 Esquema de un perfilómetro SDP



$$K_1 = \frac{k_1}{m_2} = 653 \frac{1}{s^2}$$

$$K_2 = \frac{k_2}{m_2} = 63.3 \frac{1}{s^2}$$

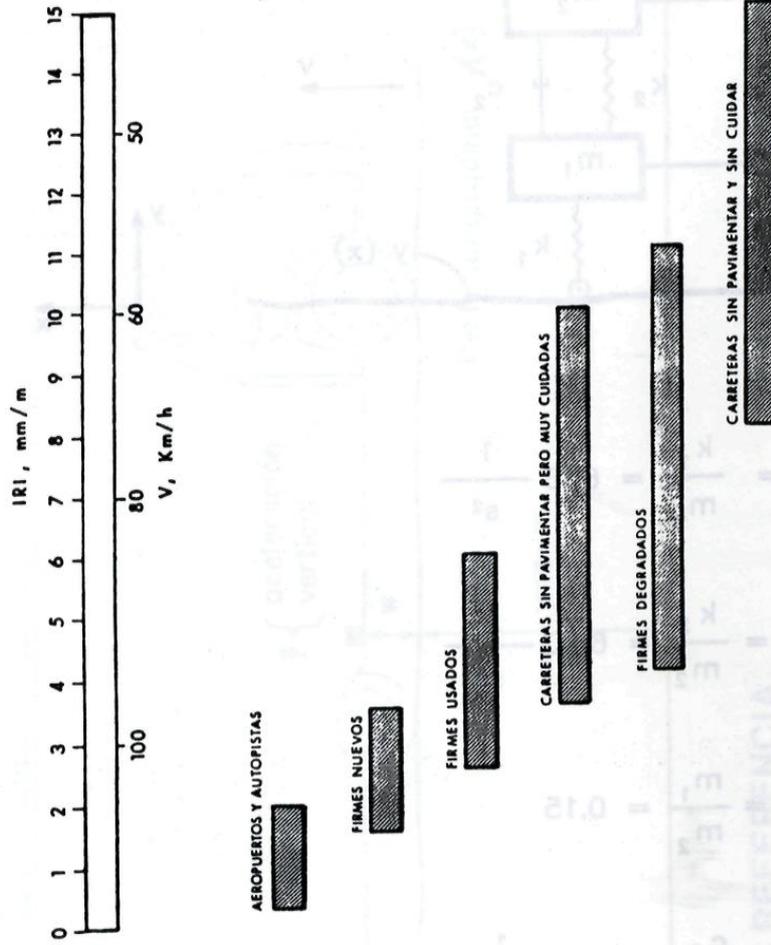
$$U = \frac{m_1}{m_2} = 0.15$$

$$C = \frac{c_2}{m_2} = 6.00 \frac{1}{s}$$

Figura N°3 Modelo del cuarto de centromóvil para el cálculo del IRI

Figura 3 Model del cuarto de centromóvil para el cálculo del IRI

Re



16

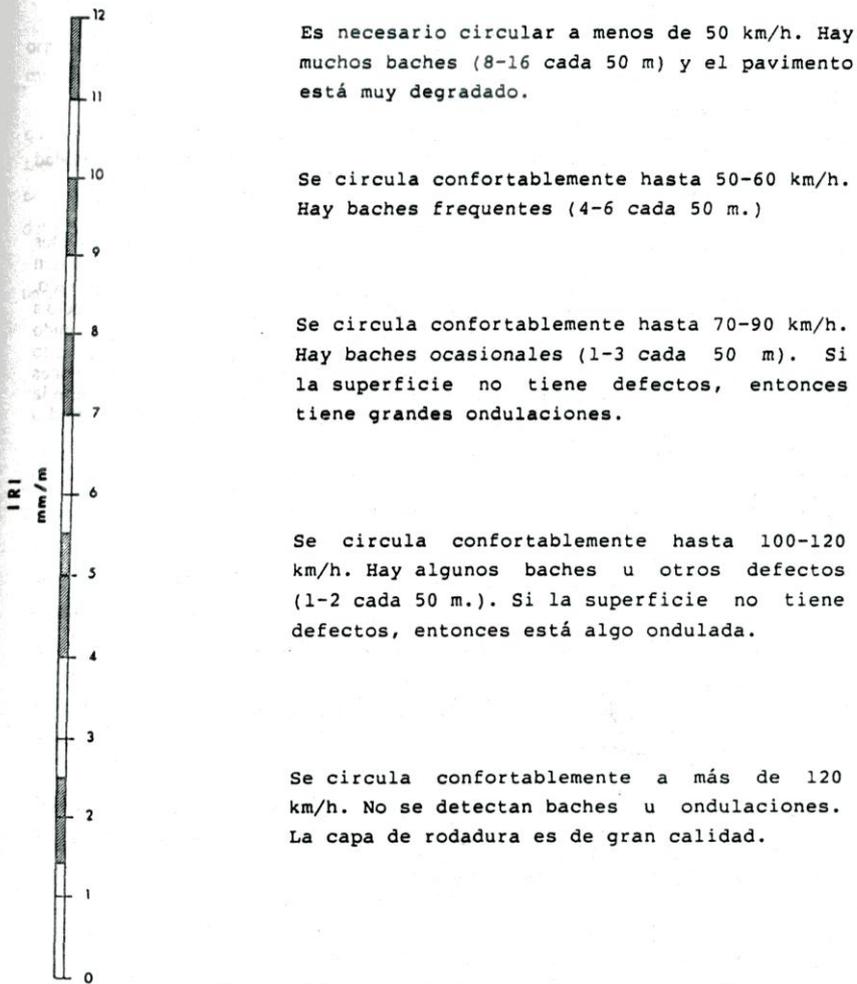
Figura N°4 Escala de valores del IRI

16

Figura 4 Escala de valores del IRI

14





**Figura N°5 Relación entre los valores del IRI y algunas características de circulación**

Figura 5 Relación entre los valores del IRI y algunas características de circulación