



ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL

INFORME DE AVANCE

Investigadora Principal

Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz

Investigador asociado

Ing. Mario Arce

DICIEMBRE 2004

1 MARCO TEÓRICO

ORIGEN

En 1982, equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica, se reunieron en Brasilia, para efectuar el “*Experimento del Índice de Regularidad Superficial*” (IRRE). El objetivo de dicho experimento fue unificar criterios para la medición de la regularidad superficial, considerando diferentes condiciones de carretera, equipos y métodos de cálculo.

DEFINICIÓN

El IRI se define coloquialmente como la suma de aceleraciones verticales no deseadas que sufre el usuario de una carretera, al circular por ella, las cuales son provocadas por las desviaciones del perfil longitudinal real respecto al perfil teórico de proyecto.

Según la definición del Banco Mundial, 1986, el IRI se calcula como la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión del vehículo patrón, (que representa la cuarta parte de un vehículo de cuatro ruedas, ver Figura N°1) dividido por la distancia recorrida por dicho vehículo, a una velocidad de 80 km/h.

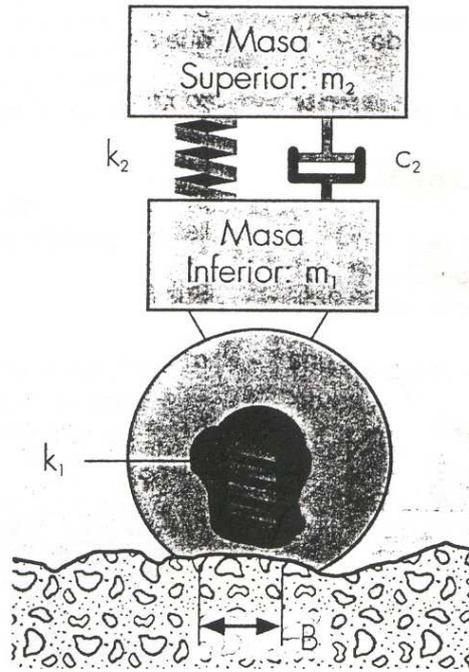


Figura N°1: Modelo de cuarto de coche, Banco Mundial. Referencia (1).

El Banco Mundial en 1986 presentó valores de IRI típicos para diferentes condiciones superficiales de la carretera (Figura N°2).

ROUGHNESS
(m/km IRI)

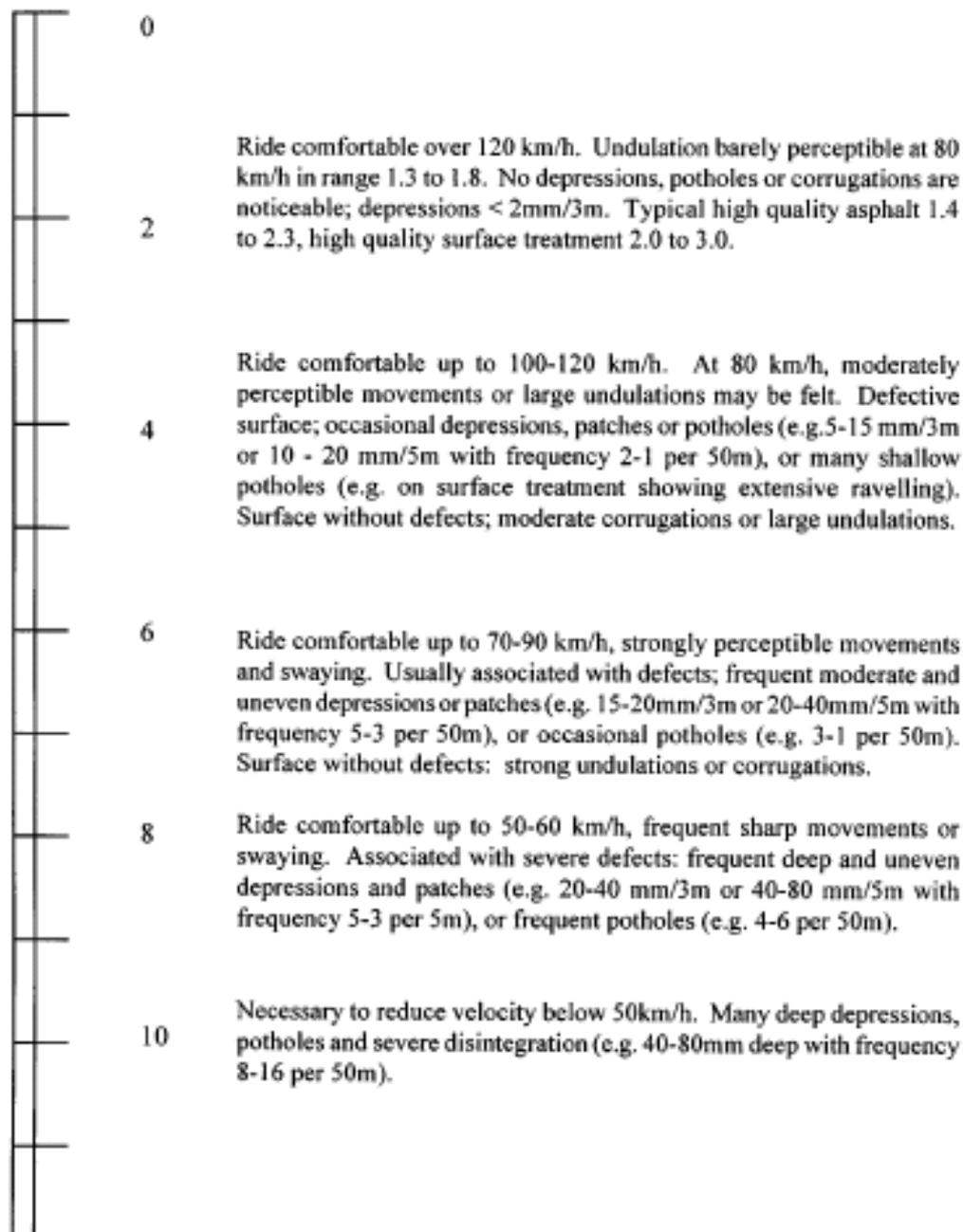


Figura N°2a: Escala de caracterización de carreteras pavimentadas con concreto asfáltico o tratamiento superficial, a partir del IRI. Referencia (2).

ROUGHNESS
(m/km IRI)

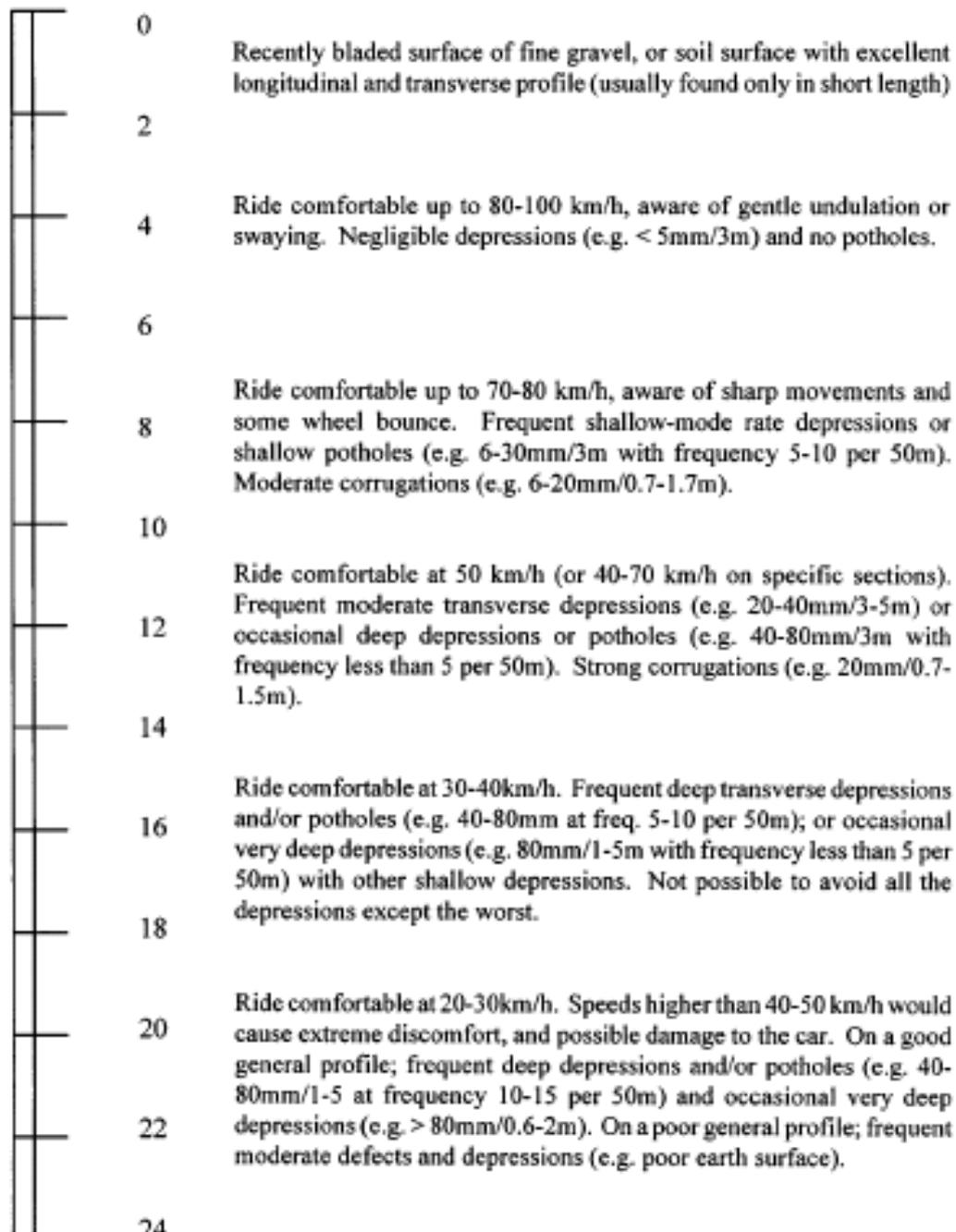


Figura N°2a: Escala de caracterización de carreteras no pavimentadas (con superficies de grava o suelo), a partir del IRI. Referencia (2).

Inicialmente, el IRI se calculaba para ambas huellas, pero en 1986 se hizo el cambio para que se midiera independientemente en cada huella. En la norma ASTM E 1926-98 "*Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*", se considera que promediar los IRI de cada huella, es una mejor medida de la regularidad superficial de la carretera.

CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS (SEGÚN EL BANCO MUNDIAL, 1986).

1.1.1 Clase 1: Perfiles de precisión

Son los más exactos para medir el IRI. Para método estáticos, el perfil longitudinal se debe medir en intervalos no mayores a 250 mm y la precisión en la elevación debe ser de 0.5 mm en pavimentos muy lisos, pudiéndose aumentar en pavimentos rugosos.

Los perfilómetros de alta velocidad deben ser validados contra un método como el de "mira y nivel", para probar su exactitud. En 1986, sólo el método de la "mira y nivel" y el de la viga TRRL se habían aceptado para validar otros métodos. Estos trabajos de validación se realizaron utilizando un rango de niveles de rugosidad amplio y en un tramo de 320 m.

1.1.2 Clase 2: Otros métodos perfilométricos

Son todos los otros equipos que no cumplen con los requerimientos de precisión y exactitud requeridos en la clase 1. Estos métodos de medición y hardwares son calibrados por métodos independientes.

1.1.3 Clase 3: IRI estimado a partir de ecuaciones de correlación

El IRI se estima a partir de ecuaciones de correlación. Este sistema de obtención del IRI fue muy practicado en los años 80 y 90, por medio de los equipos de respuesta dinámica. Las propiedades dinámicas son únicas para cada equipo y varía con el tiempo.

1.1.4 Clase 4: Evaluación subjetiva y equipos no calibrados.

El IRI se obtiene a partir de una evaluación subjetiva (experiencia y evaluación visual) o mediciones no calibradas. Aplica para casos en donde no se exija mucha exactitud en el resultado del IRI.

RECOMENDACIONES PARA EJECUTAR PROYECTOS

La exactitud en los resultados de IRI, se ven afectados por la repetibilidad, errores de calibración o por la reproducibilidad. Dependiendo del uso de los datos, el Banco Mundial brinda las siguientes recomendaciones:

□ A nivel de red

Objetivo: obtener un resumen general de la condición de la red vial, sirve como base de datos para las políticas de mantenimiento y costos de transporte, y para priorizar en los programas de rehabilitación y mantenimiento.

Aspectos por considerar: Tipo de equipo por utilizar, número de equipos, secciones de calibración, secciones de control, velocidad de medición, proceso y reporte de los datos.

□ A nivel de proyecto

Se busca mayor exactitud en los datos, se debe ser más estricto que a nivel de red. Usualmente se utilizan rangos de 0.1 ó 0.2 km para reportar los resultados.

□ A nivel de investigación

Se requieren mediciones con alta precisión y exactitud. En cada proyecto de investigación se debe definir el intervalo de medición.

INFLUENCIA DEL IRI SOBRE EL COSTO DE OPERACIÓN (REF. 4)

A la fecha, se han realizado numerosos estudios con el objetivo de obtener la relación entre costo de operación de los vehículos y la regularidad del pavimento. Estos estudios cuantifican el impacto de la geometría y regularidad del pavimento, sobre los componentes del costo de operación de diferentes clases de vehículos (combustible, neumáticos, repuestos, mano de obra de mantenimiento, depreciación del vehículo y tiempo de viaje) por períodos de 2 a 4 años.

Una de las conclusiones a las que llegó es que la regularidad tiene influencia sobre la velocidad de circulación en flujo libre de los vehículos, solamente a niveles altos de IRI, superiores a 5 m/km, tal como se aprecia en la Figura N°3.

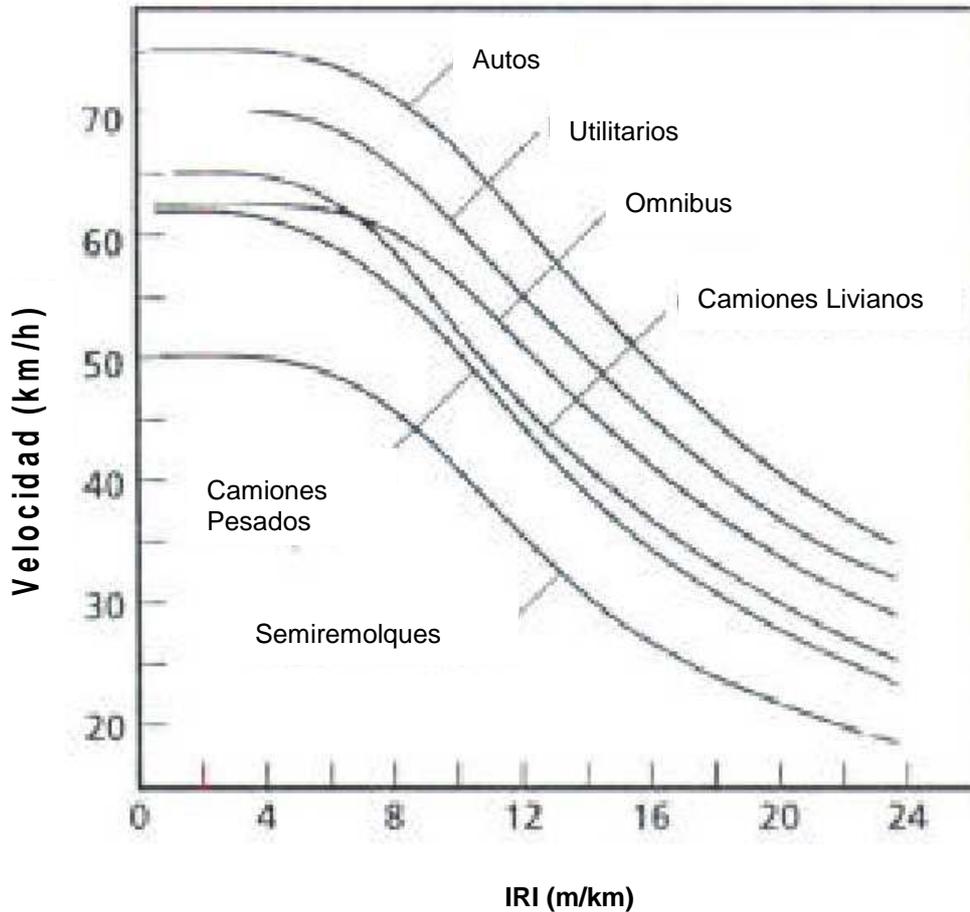


Figura N°3: Influencia de la regularidad en la velocidad de los vehículos.

En la Figura N°4 se muestran las conclusiones sobre los costos de operación, basadas en un estudio desarrollado en Brasil. Las relaciones muestran que los costos de operación aumentan entre un 2% y 4% por cada punto de IRI (mkm), con pocas variaciones entre tipos de vehículo. En general, en el rango de variación de la rugosidad en pavimentos (IRI=2 m/km para condición excelente e IRI=8 m/km para condición pobre) la variación en los costos de operación es de aproximadamente el 15%.

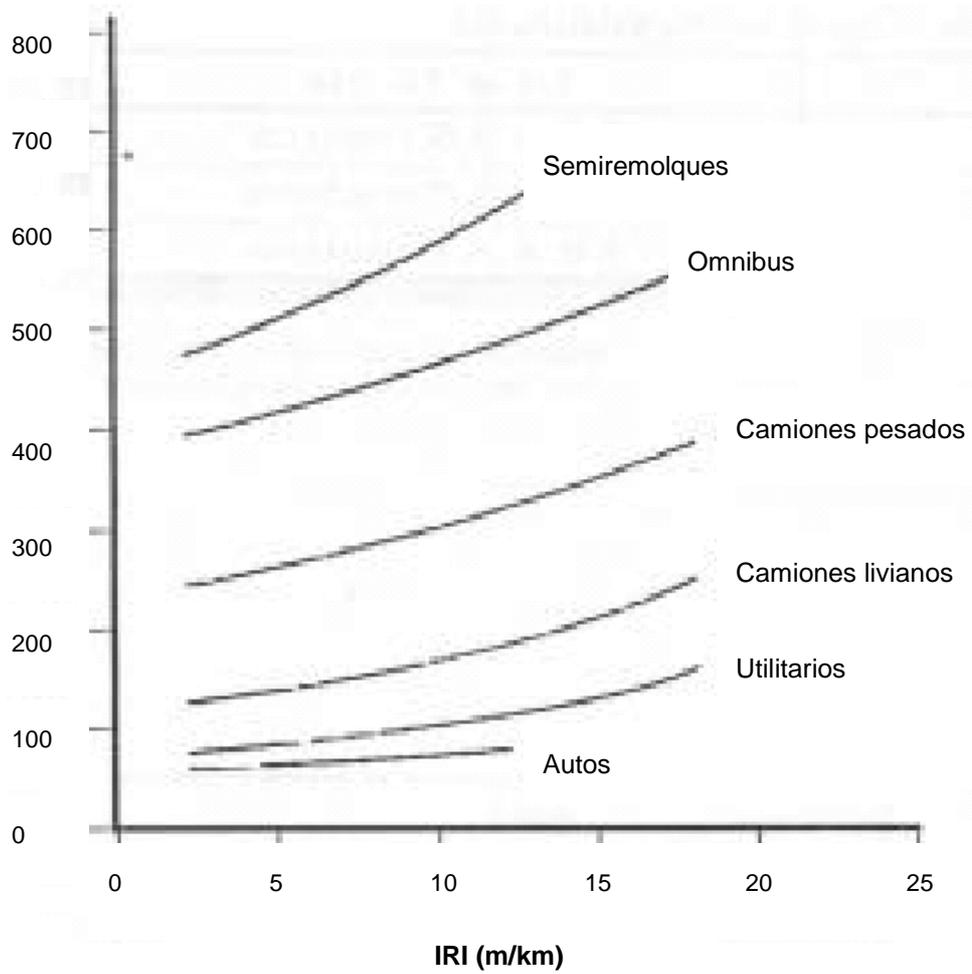


Figura N°4: Variación de los costos de operación en función del IRI.

2 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES

ESPECIFICACIÓN ESPAÑOLA

2.1.1 Evolución de las especificaciones en España

A continuación se presenta un resumen de la evolución de la normativa del IRI en España a partir del año 1989.

□ **1989**

En 1989, la *Orden Circular 308/89 C. y E.*, fija el valor de IRI aceptable en 2 m/km para la recepción definitiva de obras, basados en la experiencia española y extranjera. Este valor se determina en lotes de 100 m y en un carril de circulación. Es un límite fácilmente alcanzable si se cumplen las prescripciones vigentes.

□ **1991**

“Se modifica la normativa de 1989, por la experiencia alcanzada en esos dos años. Se acuerda que”:

“1º.- El valor del parámetro IRI = 2 m/km, establecido como valor aceptable para la capa de rodadura será el valor máximo en el 80% de la longitud del tramo, admitiéndose un valor máximo absoluto de 2,5 m/km en todo el tramo evaluado (100%) y debiéndose alcanzar un valor máximo de 1,5 m/km en la mitad de dicho tramo (50%)”.

“2º.- Para alcanzar los valores indicados en el punto anterior, se considera necesario que las capas situadas inmediatamente por debajo de la de rodadura, cumplan, asimismo, las condiciones que se fijan a continuación de forma provisional”:

Tabla N°1: Valores de IRI (m/km) para capas inferiores

CAPA	PORCENTAJE TRAMO		
	50	80	100
1ª CAPA BAJO RODADURA	2,5	3,5	4,5
2ª CAPA BAJO RODADURA	3,5	5,0	6,5

“3º.- La experiencia que se obtenga en los próximos 6 meses al aplicar lo indicado en los puntos anteriores, se comunicará por escrito a la Dirección General de Carreteras (Tecnología), con la finalidad de corregir, en su caso, los valores anteriormente indicados”.

□ **2001**

Se presenta la normativa que se establece en el “Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3”, (Colección normativa técnica, 2ª EDICIÓN - Ampliada y corregida a 1-8-2001).

En el apartado “542. Mezclas bituminosas en caliente”, en la sección “542.7 Especificaciones de la unidad terminada” se establecen los siguientes requerimientos:

“**Tabla 542.14:** Índice de regularidad internacional (IRI) (m/km) para firmes de nueva construcción”

Porcentaje de kilómetros	Tipo de capa		
	Rodadura e intermedia		Otras capas bituminosas
	Tipo de vía		
	Calzadas de autopistas y autovías	Resto de vías	
50	< 1.5	< 1.5	< 2.0
80	< 1.8	< 2.0	< 2.5
100	< 2.0	< 2.5	< 3.0

“**Tabla 542.15:** Índice de regularidad internacional (IRI) (m/km) para firmes rehabilitados estructuralmente”

Porcentaje de kilómetros	Tipo de vía			
	Calzadas de autopistas y autovías		Resto de vías	
	Espesor de recrecimiento (cm)			
	> 10	≤ 10	> 10	≤ 10
50	< 1.5	< 1.5	< 1.5	< 2.0
80	< 1.8	< 2.0	< 2.0	< 2.5
100	< 2.0	< 2.5	< 2.5	< 3.0

Además, en el apartado “542.10.3 Regularidad Superficial”, se establece:

“Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en el apartado 542.7.3, se procederá de la siguiente manera:

- Para capas de rodadura drenante:
 - o Se demolerá el lote, se retirará a vertedero y se extenderá una nueva capa por cuenta del Contratista.
- Para el resto de los casos:
 - o Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en el apartado 542.7.3 en más del diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado o de la longitud total de la obra para capas de rodadura, se extenderá una nueva capa de mezcla bituminosa con el espesor que determine el Director de las Obras por cuenta del Contratista.
 - o Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en el apartado 542.7.3 en menos del diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado o de la longitud total de la obra para capas de rodadura, se corregirán los defectos de regularidad superficial mediante fresado por cuenta del Contratista.”

□ **2002**

La Dirección General de Carreteras, en el año 2000 realizó una primera comparación entre los equipos (de alto y bajo rendimiento) que obtienen el IRI, con el objetivo de introducir modificaciones al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Como continuación de este trabajo, en el año 2002 se hizo una nueva comparación sobre el mismo tramo de carretera utilizado en el 2000.

En síntesis, el ensayo ha tenido por objeto analizar las medidas de cada uno de los equipos de alto rendimiento y compararlas con la medida de una referencia (perfilómetro pivotante tipo Dipstick) para dotar de la homogeneidad necesaria a este parámetro en las distintas mediciones que realiza la Dirección General de Carreteras (recepción de obras, auscultación sistemática de la red y auscultación específica de tramos).

La selección del Dipstick como equipo de referencia se explica por varias razones; en primer lugar porque este ha sido el equipo básico para el desarrollo del IRI; en segundo lugar, porque todas las medidas realizadas con estos equipos correlacionan entre sí con un coeficiente prácticamente igual a la unidad. Además se trata de unos equipos adecuados para la medición durante el control de calidad en la fase de construcción.

El ensayo constó de las siguientes fases:

- Toma de datos con perfilómetros pivotantes tipo Dipstick, realizando dos pasadas con cada uno de ellos.

- Toma de datos con equipos de alto rendimiento, realizando tres pasadas con cada uno de los equipos, previa calibración de los odómetros.
- Proceso de datos, estimando los valores medios de cada conjunto de medidas y comparando con la media de las medidas de los Dipstick.
- Determinación de coeficientes de corrección para cada uno de los equipos.

La Tabla N°2 resume los coeficientes de corrección determinados por el servicio de Tecnología de Carreteras, para cada uno de los distintos equipos de medida del IRI que han participado en el ensayo de comparación.

A partir de este año se procederá a la realización de un ensayo anual de comparación, en el que podrán tomar parte de forma voluntaria todos aquellos equipos que operen en el mercado nacional. Con ello, previsiblemente a finales del 2003, se actualizará esta información con los resultados del nuevo ensayo.

Tabla N°2: Coeficientes de corrección de los equipos de medida del IRI

DENOMINACION COMERCIAL	ENTIDAD QUE PRESENTA EL EQUIPO	COEFICIENTE DE CORRECCION
DIPSTICK 2000	AEPO S.A.	1,00
DIPSTICK 2000	CEDEX	1,00
DIPSTICK L-2/79	EUROCONSULT N.T.S., S.A.	1,00
DIPSTICK PERFILOMETRO GRAL	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,00
LASER PORTABLE PT-2	AEPO, S.A.	1,10
VIDEO LASER RST-11	AEPO, S.A.	1,10
ANALIZADOR DE PERFIL LONGITUDINAL (APL)	EUROCONSULT N.T.S., S.A.	1,06
GREENWOOD	INTEVIA, S.A.	1,00
GREENWOOD	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,04
GREENWOOD	CEDEX	1,08
GREENWOOD	INZAMAC, S.A.	1,15
K.J. LAW T-6500	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,04

□ **2004**

Como continuación de los trabajos de armonización de la medida del IRI, iniciados por la Dirección General de Carreteras en el año 2002, se ha organizado un nuevo ensayo de comparación, en el mes de marzo de 2003, sobre diversos tramos de la Red de Carreteras del Estado. Se invitó a tomar

parte en el ensayo a aquellas empresas de auscultación de las que se tenía conocimiento disponían de equipos para la medida del IRI.

La Tabla 3 resume los coeficientes de corrección determinados por el Servicio de Tecnología de Carreteras, para cada uno de los distintos equipos de medida del IRI que han participado en el ensayo de comparación correspondiente al año 2003.

Tabla N°3: Coeficientes de corrección de los equipos de medida del IRI. Evaluación 2003.

DENOMINACION COMERCIAL	ENTIDAD QUE PRESENTA EL EQUIPO	COEFICIENTE DE CORRECCION
DIPSTICK 2000	CEDEX	1,00
DIPSTICK L-2/79	EUROCONSULT N.T.S., S.A.	1,00
DIPSTICK PERFILOMETRO GRAL	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,00
LASER PORTABLE PT-2	AEPO, S.A.	1,10
VIDEO LASER RST-11	AEPO, S.A.	1,10
RST-19	INTEVIA, S.A.	1,08
ANALIZADOR DE PERFIL LONGITUDINAL (APL)	EUROCONSULT N.T.S., S.A.	1,06
GREENWOOD	LGAI TECHNOLOGICAL CENTER, S.A.	1,06
GREENWOOD	INTEVIA, S.A.	1,00
GREENWOOD	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,02
GREENWOOD	CEDEX	1,08
GREENWOOD	INZAMAC, S.A.	1,06
K.J. LAW T-6500	GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A.	1,04

Por otra parte, y para evitar interpretaciones erróneas de esta Nota de Servicio, se señala que la aplicación del coeficiente no supone nuevas exigencias de IRI, ya que no afecta en modo alguno a los valores fijados en los artículos del PG-3 para la recepción de las obras, sino que al contrario garantiza que todos los equipos miden en idénticas condiciones, con independencia de los algoritmos de cálculo de IRI que se empleen.

Durante el año 2004 está previsto actualizar esta información con los resultados de un nuevo ensayo.

2.1.2 Norma española para la medición del IRI, NLT-330/98.

En esta norma 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 (Figura N°5).

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. El IRI se calcula en intervalos de 100 m.

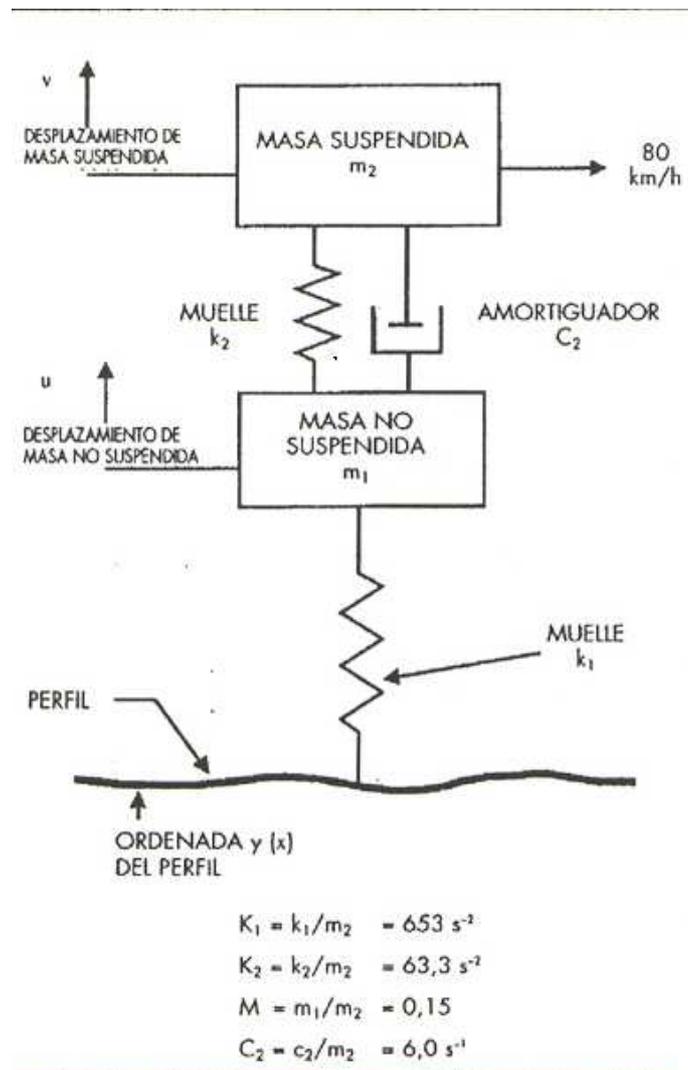


Figura N°5: Modelo para cálculo del IRI.

2.1.2.1 Propuesta para modificar las especificaciones españolas en función de la velocidad máxima permitida

En el II Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz, se presentó el artículo “Valores exigibles al IRI en función de la velocidad máxima permitida en los tramos de carretera”, de José María de Frutos Palomino, de donde se rescata:

- Rango de longitudes de onda achacables a la regularidad o irregularidad superficial: 0,5 y 50 metros.
- La normativa actual exige un mismo valor de IRI para una carretera cuya máxima velocidad permisible sea de 120 km/h con otra de velocidad máxima de 60 km/h. En este artículo se propone:

Tabla Nº4: Propuesta de requisitos a cumplir por el IRI de los pavimentos de rodadura de las carreteras en función de la velocidad máxima permitida.

Velocidad máxima permitida (km/h)	IRI (m/km)		
	50 %	80%	100 %
10	2.1	2.8	3.4
20	1.9	2.6	3.1
30	1.8	2.4	2.9
40	1.7	2.3	2.8
50	1.6	2.2	2.7
60		2.1	2.6
70	1.5	2.0	2.5
80			
90	1.4	1.9	2.4
100			
110			
120	1.3	1.8	2.3
130			
140		1.7	2.2
150			
160	1.2		

ESPECIFICACIONES VARIAS

2.1.3 Boletín informativo, México 2001.

En la Circular Técnica N°40, de la Secretaría de Comunicación y Transporte de México, presenta un resumen de especificaciones internacionales para el IRI (Tabla N°5).

Tabla N°5: Especificaciones internacionales, según Circular Técnica N°40.

País	IRI (m/km)				
	Bueno	Regular	Malo	Nivel de rechazo	Nivel de recepción de obras
Estados Unidos	< 2.4	2.4 – 4.7	> 4.7	-	-
España	-	-	-	2.5	1.85
Chile	0 - 3	3 -4	> 4	2.5	2.5
Honduras	< 3.5	3.5 – 6.0	> 6	-	-
Uruguay	< 3.9	4.0 – 4.6	> 4.6	-	-

En el año 2000, en México, se evaluó la totalidad de la Red Carretera Federal Libre de peaje, se encontró que el 77% de la longitud total tenía un IRI < 3.0, el 20.5% un IRI entre 3 y 5 y el 2.5% restante, mayor que 5.

2.1.4 Experimento FILTER (Países Bajos y Alemania)

En el mes de setiembre del año 1998, se desarrolló el experimento FILTER en los Países Bajos y Alemania, donde participaron 25 equipos de alta velocidad para medir el IRI. En este experimento se utilizó la clasificación de tramos con base en el IRI tal como se presenta a continuación:

<u>Niveles de irregularidad</u>	<u>IRI</u>
Bajo	< 1.5 m/km
Moderado	1.5 m/km - 3.5 m/km
Mediocre	> 3.5 m/km

2.1.5 Especificaciones de Regularidad en Perú (1995)

En el 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, realizado en Sevilla, España, se dieron a conocer las especificaciones de regularidad adoptadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (1995). Con base en el documento publicado, la regularidad de los pavimentos se debe controlar con base en el IRI característico (IRI_c), el cual es igual al IRI promedio más el producto de un coeficiente estadístico igual a 1.645 por la desviación estándar ($IRI_c = IRI_{prom} + 1.645 D_{esv} E_{st}$). Calculado el IRI característico, el sector o tramo es aceptado si cumple con las siguientes condiciones:

- en tramos de pavimento de nueva construcción, el IRI_c debe ser menor o igual a 2.0
- en tramos de refuerzo del pavimento (recapados), el IRI_c debe ser menor o igual a 2.5
- en tramos de sellado del pavimentos, el IRI_c debe ser menor o igual que 3.0

3 NORMAS DE ENSAYO

A continuación se presentan las normas relacionadas con el cálculo del IRI a partir de la información recopilada con un perfilómetro láser.

ASTM E 950-98 “STANDARD TEST METHOD FOR MEASURING THE LONGITUDINAL PROFILE OF TRAVELED SURFACES WITH AN ACCELEROMETER ESTABLISHED INERTIAL PROFILING REFERENCE”.

Este procedimiento de ensayo abarca la medición y almacenamiento del perfil de la superficie evaluada, con una referencia inercial establecida con los acelerómetros presentes en el vehículo de medición.

A continuación se presenta un resumen con las principales requerimientos de esta norma.

3.1.1 Equipo

- Si se van a medir dos huellas simultáneamente, la separación entre los láser debe estar entre 1.5 m y 1.8 m. Además, se debe incluir un set de bloques para calibrar y validar la operación estática de los láser.
- El rango de los acelerómetros debe ser lo suficientemente amplio para acomodar los niveles de aceleración esperados de los movimientos o saltos del vehículo de medición. Su rango mínimo debería de ser ± 1 g.
- Para los láser, se establecen los siguientes requerimientos, dependiendo de la clase de equipo:

Tabla N°6: Intervalo longitudinal

Clase	Requerimiento
Clase 1	Menor o igual a 25 mm (1 in)
Clase 2	Mayor que 25 mm (1 in) hasta 150 mm (6 in)
Clase 3	Mayor que 150 mm (6 in) hasta 300 mm (12 in)
Clase 4	Mayor que 300 mm (12 in)

Tabla N°7: Resolución vertical

Clase	Requerimiento
Clase 1	Menor o igual a 0.1 mm (0.005 in)
Clase 2	Mayor que 0.1 mm (0.005 in) hasta 0.2 mm (0.010 in)
Clase 3	Mayor que 0.2 mm (0.010 in) hasta 0.5 mm (0.020 in)
Clase 4	Mayor que 0.5 mm (0.020 in)

- El dispositivo que se utiliza para medir distancia, lo debe hacer a intervalos que cumplan con lo establecido en la Tabla N°6. Este dispositivo se debe calibrar.
- Marcas de ubicación. Cuando se requiere un punto de inicio o fin muy exacto, se puede colocar marcas para que el equipo las detecte automáticamente.
- Existen dos métodos para obtener los datos del perfil:
 - con base en el espacio, los equipos que toman las mediciones lo hacen basándose en la distancia recorrida. En este caso el almacenamiento de datos es independiente de la velocidad de medición del equipo.
 - con base en el tiempo, aquí los datos son adquiridos en función de un intervalo de tiempo fijado. En este caso el almacenamiento de los datos no es independiente de la velocidad de medición del equipo.

- Filtro de los datos. El filtro no debe permitir la atenuación o amplificación de longitudes de onda hasta al menos 60 m, para velocidades entre 25 y 95 km/h.

3.1.2 Procedimientos de calibración

Es importante que los equipos de medición cumplan con las recomendaciones de calibración que brinda cada empresa fabricante.

- Acelerómetros. Deben tener un procedimiento de calibración interno o externo.
- Láser. Deben ser estáticamente calibrados con un bloque o set que tenga una medida exacta, de al menos 25 mm y que cumpla con los requerimientos de la clase.
- Medidor de distancia. Este medidor se debe calibrar midiendo una distancia predeterminada en línea recta. Esta distancia debe ser lo suficientemente larga para determinar diferencias significativas entre la medida que se va a realizar y la distancia actual predeterminada. Un error mayor al 0.1% de la distancia actual no debe ser aceptado.

3.1.3 Procedimiento de medición

- Encender el equipo. Dar un tiempo prudencial para que los sistemas se estabilicen. Realizar los chequeos de calibración al iniciar la jornada de trabajo y las indicaciones del fabricante.
- Evitar tomar mediciones a velocidades inferiores a 25 km/h, ya que la calidad de las longitudes de onda contenidas en el perfil se puede ver afectadas y se demanda mayor resolución en los acelerómetros. En casos especiales donde el efecto en las longitudes de onda no sea importante, por ejemplo calles rugosas o cruces líneas férreas, la velocidad se puede disminuir hasta 7.2 km/h.
- Evitar cambios repentinos de velocidad para minimizar las entradas “no queridas” de aceleración.
- El equipo debe adquirir la velocidad de medición antes de iniciar el almacenamiento de datos, para lo cual se recomienda una distancia de aproximadamente 150 m.

3.1.4 Reporte de medición

Un reporte de medición debe tener como mínimo:

- Fecha y hora de la medición.
- Operador del equipo, conductor e identificación del vehículo.
- Condiciones climáticas: principalmente temperatura, si estaba nublado, ventoso, etc.
- Ubicación y descripción del proyecto evaluado.
- Descripción de la superficie evaluada: tipo de pavimento y condición.
- Número de ruta.
- Velocidad de medición.
- Dirección o sentido de medición.
- Carril evaluado, posición transversal.
- Resultados de perfil y
- Información adicional que se considere necesaria en cada proyecto.

3.1.5 Precisión

La precisión en un perfil del pavimento se expresa como el promedio de todas las desviaciones estándar de los valores observados en puntos específicos a lo largo del perfil de carretera medido. Para hacer esto, se necesita tener las siguientes variables fijas y con los valores que a continuación se exponen:

- Longitud del tramo: 320 m.
- Puntos de medición: 1057, considerando un intervalo de medición de 0.3m.
- Número de mediciones: 10 veces
- Se deben controlar al máximo, las variables independientes que afectan las mediciones:
 - * seleccionar un tramo con poca variación en su perfil transversal.
 - * pasar las 10 veces por la misma posición (centrado en la huella).
 - * se pueden utilizar marcas automáticas, para definir el punto de inicio.

En la Tabla N°8 se presentan los valores máximos que se deben cumplir en cuanto a precisión

Tabla N°8: Requerimientos de precisión.

Clasificación del equipo	Precisión (σ)
1	0.38 mm (0.015 in)
2	0.76 mm (0.030 in)
3	2.50 mm (0.100 in)

3.1.6 Sesgo

El sesgo se refiere a la diferencia entre el valor promedio de varias repeticiones de medición de perfil en un mismo punto del tramo evaluado y el valor de referencia para ese mismo punto. Este valor de referencia se puede obtener por ejemplo por el método de “mira y nivel”. Para obtener este valor de referencia, se puede repetir el ensayo las veces que sean necesarias para obtener un valor de referencia en cada ubicación con su respectiva desviación estándar. Para comparar los resultados, ambos datos deben pasar por el mismo método de filtración.

Los datos originales, es decir, los que se van a tomar como referencia, no se deben ver afectados por longitudes de onda de hasta 100 m.

El sesgo total se calcula como la sumatoria en valor absoluto de cada uno de los “sesgos” calculados en cada punto a lo largo del tramo de medición, dividido entre el número específico de puntos.

Para realizar este ensayo, se debe considerar una longitud de 320 m, en total se van a considerar 1057 puntos de medición, ya que el intervalo es de 0.3m. En la Tabla N°9 se muestran los límites máximos que se admiten para cada clase de equipo.

Tabla N°9: Requerimientos para sesgo.

Clasificación del equipo	Exactitud
1	1.25 mm (0.050 in)
2	2.50 mm (0.100 in)
3	6.25 mm (0.250 in)

ASTM E 1170-97(2001) “STANDARD PRACTICES FOR SIMULATING VEHICULAR RESPONSE TO LONGITUDINAL PROFILES OF TRAVELED SURFACES”.

Este procedimiento abarca el cálculo de la respuesta vehicular, a partir de los datos de perfil del pavimento evaluado. Para lograrlo, se utilizan programas de simulación (cuarto, medio o carro completo).

La primer práctica para obtener la respuesta vehicular utiliza los modelos de simulación de un cuarto de carro o medio carro. Las entradas son el movimiento relativo acumulado entre la masa suspendida y la masa no suspendida del vehículo de simulación, para una distancia predeterminada. Las unidades son movimiento relativo acumulado por unidad de distancia evaluada (m/km).

Y la segunda práctica utiliza cualquier sistema de simulación, cuarto de carro, medio carro o carro completo; para obtener la aceleración del vehículo (como un cuerpo). El historial de aceleración puede calcularse como función del tiempo o distancia, o ambos.

3.1.7 Equipo

- *Computadora.* Los datos que se procesan se deben haber obtenido mediante la norma ASTM E 950. Se debe utilizar un sistema de filtro que evite la atenuación a frecuencias tan pequeñas como 0.1 Hz a velocidades de 15 a 90 km/h.
- *Aparato para almacenar datos.* Debe existir un dispositivo para las lecturas y almacenamiento de los datos de perfil.
- *Datos digitales del perfil.* Los datos de perfil deben ser almacenados a intervalos no mayores que un tercio de la longitud de onda requerida para la representación exacta de la superficie evaluada. Generalmente, un intervalo de 600 mm es válido para la representación de la mayor parte de tipos de superficie, sin embargo, cuando hay tramos localizados muy rugosos, se puede utilizar un intervalo de 150 mm.

3.1.8 Programas de simulación vehicular

Como se mencionó anteriormente, esta norma utiliza 4 modelos de simulación: un cuarto de carro, medio carro, carro completo con las cuatro ruedas con suspensión independiente y carro completo con el eje trasero sólido.

El modelo de cuarto de carro, se muestra en la Figura N°6, con z_1 como el desplazamiento de la masa suspendida (cuerpo del vehículo), y z_2 como el desplazamiento de la masa no suspendida (llanta) y z_p como el perfil longitudinal.

El movimiento relativo entre el cuerpo del vehículo y su eje, Z' , se define como:

$$Z' = z_1 - z_2$$

Los parámetros utilizados en este modelo, son normalizados por la masa que representa el cuerpo del vehículo, M_1 . Los otros parámetros son: K_1 , constante elástica (del resorte); C_1 , valor del amortiguador; M_2 , masa de los ejes del vehículo; K_2 , rigidez de las llantas y C_2 , constante de amortiguamiento de la llanta.

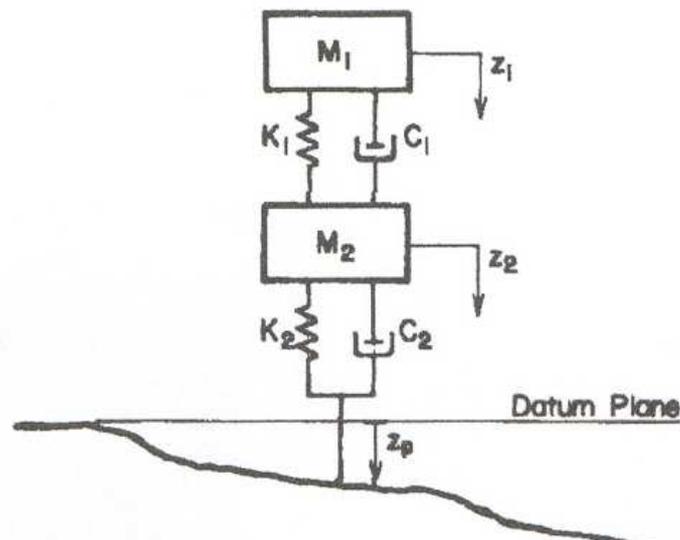


Figura N°6: Modelo de cuarto de coche

3.1.9 Aplicaciones

Una de las aplicaciones de estos modelos, es la obtención del Índice de Regularidad Internacional, IRI. El IRI inicia en 1982, con el experimento de regularidad en Brasil, desarrollado por el Banco Mundial. El IRI es la medición del desplazamiento de la masa suspendida respecto a la no suspendida en el modelo de un cuarto de carro y es reportado en unidades de desplazamiento por longitud. Con este método se utiliza el modelo de respuesta vehicular estándar de un cuarto de coche.

ASTM E 1364-95 (2000) “STANDARD TEST METHOD FOR MEASURING ROAD ROUGHNESS BY STATIC LEVEL METHOD”.

Con este ensayo se mide el perfil longitudinal de la superficie utilizando un método estático, con el objetivo de obtener el índice de regularidad de esa superficie. Este método aplica para todo tipo de carretera (pavimentada o no pavimentada) donde circulen vehículos convencionales.

Este método de ensayo es más intensivo, requiere mayor labor. Se utiliza básicamente para validar otros métodos de medición de perfil, y para calibrar los equipos de respuesta.

El método incluye dos niveles de exactitud, los cuales se escogen dependiendo de la necesidad. Clase 1: reduce el error de medición del índice de regularidad a menos del 2% del valor real del índice. Clase 2: involucra valores menores al 5%.

3.1.10 Resumen

Medidas de elevación (perfil) se obtienen en intervalos constantes, a lo largo de una línea de la superficie, con el objetivo de determinar su perfil. La línea utilizada para determinar este perfil, es la “huella”. Las mediciones que se hacen, son la entrada a un programa de computadora, en el cual se hace un despliegue gráfico de la información y su análisis, que consiste en un algoritmo que brinda como resultado el índice de regularidad.

El equipo convencional para desarrollar este método, consiste en un nivel y una mira debidamente graduados; pero también se pueden aplicar técnicas automáticas (por ejemplo sistemas basados en láser) con ajustes apropiados.

3.1.11 Equipo

- *Cinta.* Se utiliza una cinta de topógrafo para localizar los intervalos de medición. La exactitud de la cinta debe estar dentro del 0.2% de su longitud total.
- *Nivel.* El nivel debe ser diseñado, de tal manera que brinde alturas con la resolución requerida. Cuanto más regular sea la superficie, más resolución se exige, tal como se muestra en la Tabla N°10. En proyectos muy rigurosos (pavimentos regulares), los equipos que cumplan los requerimientos del rango 0.5 y 1.0 m/km de IRI se pueden utilizar perfectamente. Cuando se va a calibrar un perfilómetro inercial, se tiene que hacer con los estándares de resolución de la clase 1, ver Tabla N°10.

- *Mira.* La mira debe ser marcada de manera tal que las diferencias entre dos puntos adyacentes, puedan ser discernidas con la precisión requerida. La base de la mira se debe diseñar de manera que permita la fácil repetibilidad de las mediciones. En superficies con textura muy lisa, cualquier base funciona; pero en superficies rugosas, se sugiere utilizar bases circulares con un diámetro de al menos 20 mm, con el objetivo de reducir las pequeñas variaciones a la hora de colocar la mira.
- *Computadora.* Debido al potencial error humano en la manipulación de tantos datos, se debería utilizar una computadora para todos los cálculos. Esta computadora debe ser capaz de: almacenar todos los datos, ejecutar programas y desplegar gráficamente los resultados.

Tabla N°10: Requerimientos de resolución

Rango del IRI (m/km)	Resolución requerida mm	
	Clase 1	Clase 2
$0 \leq \text{IRI} \leq 0.5$	0.125	0.25
$0.5 \leq \text{IRI} \leq 1.0$	0.25	0.5
$1.0 \leq \text{IRI} \leq 3.0$	0.5	1.0
$3.0 \leq \text{IRI} \leq 5.0$	1.0	2.0
$5.0 \leq \text{IRI} \leq 7.0$	1.5	3.0
$7.0 \leq \text{IRI}$	2.0	4.0

- *Almacenamiento de datos.* Con el objetivo de agilizar la toma de datos y eliminar posibles errores humanos, se recomienda el uso de formularios, éstos deben traer los intervalos de medición ya predefinidos.

3.1.12 Procedimiento

- Selecciones la (s) huella donde se van a llevar a cabo las mediciones.
- Marque con tiza o pintura los puntos de inicio y fin de la línea de medición. Además, cada cierto intervalo (no mayor a 15 m) se debe verificar la posición transversal de la línea. Con esto se asegura que cualquier equipo de medición va a tomar las mediciones en los mismos puntos.
- Coloque la cinta sobre la línea de medición (huella). Inicialmente, el “cero” de la cinta se coloca en el inicio de la línea. Asegure la cinta con algún adhesivo o peso. Tome las mediciones a lo largo de la longitud de la cinta. Cuando esto ya se ha llevado a cabo, mueva la cinta hasta la nueva

posición de “cero”, que corresponde con el punto final de la medición anterior.

3.1.13 Cálculo

- Se debería preparar un gráfico con los datos de perfil a lo largo de la longitud evaluada, con el objetivo de identificar puntos salidos o bajos, que pudieran haberse tomado erróneamente. La escala que se utilice en estos gráficos, debe ser tal que errores de elevación de 2.5mm sean visibles.
- Estos datos de perfil son la entrada para aplicar el software del Banco Mundial WTP-46 (páginas 31 a la 43), con el que se calcula el IRI.
- Si los datos de perfil se van a utilizar para validar un equipo perfilométrico, el mismo análisis que utiliza el equipo por calibrar, se debe aplicar a los datos de perfil. Los gráficos de perfil sólo se pueden comparar si ambos han sido filtrados idénticamente.

ASTM E 1926-98 “STANDARD PRACTICE FOR COMPUTING INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX OF ROADS FROM LONGITUDINAL PROFILE MEASUREMENTS”.

Esta norma de ensayo abarca la metodología matemática para procesar las mediciones de perfil longitudinal, para obtener el Índice de Regularidad Internacional (IRI).

El algoritmo que se desarrolla en esta norma, es el mismo propuesto con el Experimento Internacional de Regularidad de Carreteras, conducido por el Banco Mundial. Esta información se encuentra en los documentos WTP-45 y WTP-46 del Banco Mundial.

3.1.14 Importancia y uso

La información de regularidad es útil como entrada para los programas de administración de carreteras. El valor de IRI sobre la huella derecha es el valor especificado por la Federal Highway Administration (FHWA) como entrada para su Sistema de Monitoreo del Desempeño de Carreteras (HPMS).

Cuando el perfil se mide simultáneamente en ambas huellas, el promedio de los IRI en las huellas derecha e izquierda, se considera una mejor medida de la regularidad, que el valor de IRI en cada huella individualmente.

4 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Existen diversos criterios para clasificar los equipos de medición. En este documento se clasifican como equipos de medición estática y dinámica. Es importante indicar que en ambos grupos existen equipos basados en una referencia absoluta (es decir que miden directamente el perfil) y los que no se basan en referencias absolutas, por ejemplo la regla de 3 m o los equipos de tipo respuesta (que miden la regularidad en función de la respuesta del equipo dinámico).

EQUIPOS DE MEDICIÓN ESTÁTICA

A este grupo pertenecen: levantamientos con mira y nivel, el Dipstick. Este último equipo, aunque inicialmente fue desarrollado para medir irregularidades en pisos de edificios, es el que en la actualidad se utiliza más para medir el perfil de carreteras, principalmente en obras nuevas (aceptación de obra terminada) y en la validación de otros equipos perfilmétricos. En el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), se cuenta con este equipo, Figura N°7.



Figura N°7: Dipstick

EQUIPOS DE MEDICIÓN DINÁMICA

Al igual que los estáticos, pueden ser con referencia absoluta o sin ella. Estos equipos son los que se utilizan con mayor frecuencia, dado su alto rendimiento. Aquí se incluyen los equipos de tipo respuesta y los perfilómetros láser. El LANAMME cuanto con un perfilómetro inercial (láser). Ver Figura N°8.



Figura N°8: Perfilómetro inercial

El perfilómetro del LANAMME es marca Dynatest RSP 5051 Mark II L3.2, cuenta con 3 sensores láser y dos acelerómetros colocados en los puntos que recorren las huellas. Estos dispositivos se ubican sobre una barra de medición, en la parte delantera del vehículo (Figura N°8), cuyo ancho efectivo es de aproximadamente 1.85 m. El RSP (Road Surface Profiler) toma 16 000 mediciones de perfil por segundo y almacena los datos cada 25 mm. El valor almacenado corresponde al promedio del número de mediciones tomadas en los 25 mm. Todos los resultados que despliega el equipo, se basan en estos datos.

Este equipo calcula el IRI en cada láser, con base en las especificaciones del Banco Mundial. Las mediciones de perfil que realiza, cumplen con los requisitos de precisión y sesgo de los equipos clase 1, según la norma ASTM E-950.

5 BIBLIOGRAFÍA

1. Frutos Palomino, José María; Valores exigibles al índice de regularidad internacional (IRI) en función de la velocidad máxima permitida en los tramos de carretera. II Congreso Andaluz de Carreteras, Cádiz, abril 2000.
2. Sayers, M.W.; Gillespie, T.D. y Paterson W. D. O., Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, Technical Paper Number 46. Banco Mundial, Washington 1986.
3. Sayers, M.W.; Gillespie, T.D. y Queiroz, C., The International Road Roughness Experiment, Technical Paper Number 45. Banco Mundial, Washington 1986.
4. Poncino, H.; Pagola, M.; Giovanon, O.; Noste, M. Y Tosticarelli, J.; Rugosidad de Pavimentos.
5. Dirección General de Carreteras, Orden circular 308/89 C. y E. España, 1989.
6. Dirección General de Carreteras, Nota de servicio complementaria de la OC 308/89 C. y E. sobre recepción de obras. España, 1991.
7. Dirección General de Carreteras, Nota de servicio sobre la armonización de la medida del índice de regularidad internacional (IRI) y la correlación entre los diferentes equipo de medida. España, 2002.
8. Dirección General de Carreteras, Nota de servicio correspondiente al año 2003 sobre la armonización de la medida del índice de regularidad internacional (IRI) y la correlación entre los diferentes equipo de medida. España, 2004.
9. NLT-330/98: Cálculo del índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España, 1998.
10. Anchuelo M. Alonso, Achútegui V. Francisco; Experimento Internacional para la Armonización de medidas de regularidad superficial. Proyectos Even y Filter.

11. Águila R.,Pablo; Experiencias y Resultados obtenidos en la evaluación de la rugosidad de más de 3 000 km de pavimentos en el Perú y otros países.
10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Sevilla, 1999.

ESQUEMA EXPERIMENTAL

- Seleccionar 3 tramos

Tramo con IRI bajo: Ruta 34 (Pozón-Tárcoles), Ruta 2 (San Isidro – Río Convento), Ruta 32 (Pocora – Herediana).

Tramo con IRI medio: Ruta 1 (Liberia – Quebrada Grande), Ruta 150 (Sámara), Ruta 21 (Mansión – Santa Rita), Ruta 126 (Heredia – Vara Blanca).

Tramo con IRI alto: Ruta 125 (Alajuela - Carrizal), Ruta 712 (San Isidro - Fraijanes), Ruta 402 (Cot – Santa Rosa)

Variable	Escenarios	Réplicas	Tramos experimentales	Total
Velocidad	1) 40 km/h 2) 60 km/h 3) 80 km/h	3	3	432
Perfil	1) 10 cm 2) 20 cm 3) 30 cm 4) 40 cm			
IRI	1) 20 m 2) 50 m 3) 100 m 4) 200 m			

Nuevas Variables: longitud de onda.

