

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE
LAS VÍAS TERRESTRES**

TESIS PROFESIONAL

**Diseño y construcción de un equipo tipo respuesta de bajo costo para la
medición del IRI basado en una tarjeta de adquisición de datos**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN:

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS
TERRESTRES**

PRESENTA:

YESENIA RODRÍGUEZ MÉNDEZ

ASESOR:

DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL JORGE ALARCÓN IBARRA

COASESOR:

DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA NELIO PASTOR GÓMEZ



MORELIA, MICHOACÁN, FEBRERO DE 2016

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme seguir preparándome.

Al posgrado de Ingeniería Civil, Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres por la oportunidad y confianza que se me dio al ingresar, en especial al Dr. Jorge Alarcón Ibarra y el Dr. Nelio Pastor Gómez por su apoyo durante el desarrollo de proyecto, por compartir sus conocimientos conmigo.

A José Francisco Ramos Herrera por su valiosa aportación en el desarrollo del proyecto, compañero y amigo.

A la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) Unidad General de Servicios Técnicos y Unidad Regional de Servicios Técnicos, por su apoyo para la conclusión del proyecto.

Dedicatorias

A mis padres Amparo Méndez y Eloy Rodríguez por su infinito amor y apoyo incondicional, por alentarme a luchar por mis sueños.

A mis hermanos por ser mi mayor motor, porque son mi ejemplo a seguir, por siempre estar ahí en el momento preciso, por darme la oportunidad de triunfar, por forjar mi camino.

.

Tabla de contenido

Agradecimientos	I
Dedicatorias.....	II
Tabla de contenido.....	III
Índice de figuras.....	V
Índice de tablas.....	IX
Resumen.....	X
Abstract	XI
Glosario.....	1
Introducción	2
Justificación.....	3
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Capítulo I.....	6
Índice Internacional de Rugosidad	6
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Definición.....	8
1.3. Criterios del Índice Internacional de Rugosidad	9
1.4. Equipos para la medición de la rugosidad superficial	10
1.5. Factores que influyen en la medición de la rugosidad superficial	17
Capítulo II	20
Materiales y métodos	20
2.1. Escala y características del IRI	21
2.2. Medición del IRI	23

2.2.1. Algoritmo de cálculo del IRI	24
Capítulo III.....	31
Estructura general del instrumento para medición del IRI	31
3.1. Estructura general de un instrumento	31
3.2. Instrumentación virtual	33
3.3. Instrumento virtual para medir el IRI	36
3.3.1. Elementos del instrumento para medición del IRI.....	36
Capítulo IV	43
Diseño del hardware y software	43
4.1. Equipo tipo respuesta	43
4.2. Desarrollo del equipo medidor de IRI	44
4.3. Software para obtención del IRI	53
4.3.1. Descripción del software para la medición del IRI.....	55
Capítulo V.....	57
Descripción del proceso de calibración	57
5.1. Requisitos para la calibración.....	58
5.1.1. Procedimiento de calibración para el equipo medidor de IRI	59
Conclusiones.....	62
Apéndices	63
A. Costo de construcción de equipo medidor de IRI	63
B. Deterioros en los pavimentos	64
Referencias.....	88

Índice de figuras

Capítulo I

Figura 1.1. Modelo cuarto de carro.....	8
Figura 1.2. Perfilador láser.....	11
Figura 1.3. Perfilógrafo tipo California.....	12
Figura 1.4. Perfilador de peso ligero.....	13
Figura 1.5. Walking Profiler.....	14
Figura 1.6. Vista lateral del May's de una la Unidad Regional de Servicios Técnicos.....	15
Figura 1.7. Rugosímetro del Departamento Público de carreteras (BPR).....	16

Capítulo II

Figura 2.2. Representación gráfica del modelo cuarto de carro.....	22
Figura 2.3. Escala de rugosidad en base al IRI.....	23
Figura 2.4. Pseudocódigo para cálculo del IRI.....	27

Capítulo III

Figura 3.1. Estructura general de un instrumento.....	32
Figura 3.2. Instrumentos tradicionales (izquierda) e instrumentos virtuales basados en software (derecha) comparten a gran escala la misma arquitectura en componentes, pero con filosofías radicalmente diferentes.....	35
Figura 3.3. Tarjeta de adquisición de datos USB-6009.....	37

Figura 3.4. Sensor analógico de desplazamiento lineal.....	38
Figura 3.5. Acelerómetro de tres ejes.....	39
Figura 3.6. Sensor de efecto Hall lineal.....	40
Figura 3.7. Imán de neodimio.....	40
Figura 3.8. Vehículo ligero tipo remolque de un solo eje.....	41
Figura 3.9. Equipo medidor de IRI.....	42

Capítulo IV

Figura 4.1 Componentes de equipo tipo respuesta.....	44
Figura 4.2 Vehículo ligero tipo remolque.....	44
Figura 4.3. Eje con suspensión McPherson.....	45
Figura 4.4. Desglose de eje.....	45
Figura 4.5. Dimensiones de carrocería (1).....	46
Figura 4.6. Dimensiones de carrocería (2).....	47
Figura 4.7. Posición de sensores de desplazamiento lineal.....	48
Figura 4.8. Posición del acelerómetro.....	48
Figura 4.9. Posición del sensor de efecto hall.....	49
Figura 4.10. Colocación de sensor de desplazamiento lineal.....	50
Figura 4.11. Sistema de funcionamiento de sensor de desplazamiento lineal.....	51
Figura 4.12. Caja para cubrir resorte-y amortiguador.....	51
Figura 4.13. Posición de tarjeta de adquisición de datos.....	52
Figura 4.14. Ejemplo de panel frontal de LabVIEW	53
Figura 4.15. Ejemplo de diagrama de bloques de LabVIEW.....	54
Figura 4.16 Ejemplos de iconos de LabVIEW.....	54

Capítulo V

Figura 5.1. Inicio de tramo de calibración Morelia-Quiroga acceso a Teremendo km 7+300 a km 7+600 S-2.....	59
--	----

Apéndice B.

Figura B.1. Bache en pavimento flexible.....	64
Figura B.2. Levantamiento por congelación.....	65
Figura B.3. Desprendimiento del agregado.....	66
Figura B.4. Pulido de la superficie.....	67
Figura B.5. Deficiencias del sellado.....	73
Figura B.6. Diagrama descriptivo de una junta saltada.....	74
Figura B.7. Junta Saltada.....	74
Figura B.8. Separación de la junta longitudinal.....	75
Figura B.9. Diagrama descriptivo de una grieta de esquina.....	76
Figura B.10. Grieta de esquina.....	76
Figura B.11. Diagrama de una grieta longitudinal.....	77
Figura B.12. Grieta longitudinal.....	77
Figura B.13. Diagrama descriptivo de una grieta transversal.....	78
Figura B.14. Grieta transversal.....	78
Figura B.15. Fisuramiento por retracción tipo malla.....	79
Figura B.16. Diagrama descriptivo del agrietamiento por durabilidad.....	79
Figura B.17. Diagrama descriptivo del levantamiento localizado.....	80
Figura B.18. Levantamiento localizado.....	80

Figura B.19. Diagrama descriptivo del escalonamiento de juntas y grietas.....	81
Figura B.20. Escalonamiento en junta.....	81
Figura B.21. Diagrama descriptivo de un parche deteriorado.....	82
Figura B.22. Parche deteriorado.....	82
Figura B.23. Diagrama descriptivo de fragmentación múltiple.....	83
Figura B.24. Fragmentación múltiple.....	83

Índice de tablas

Capítulo I

Tabla 1.1. Condición del camino respecto al ISA.....7

Tabla 1.2. Factores que influyen en la medición de la rugosidad carretera.....19

Capítulo III

Tabla 3.1. Clasificación de los sensores y algunos ejemplos según Ramón

Pallas Areny.....32

Tabla 3.2. Comparativa instrumento tradicional vs instrumento virtual.....35

Apéndice A.

Tabla A.1. Costo de construcción e instrumentación de equipo para medición

del IRI.....63

Resumen

Debido a las irregularidades que se presentan los pavimentos, causadas por su operatividad y agentes ambientales, como también influye el proceso constructivo y calidad de los materiales, es necesario realizar estudios del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para evaluar el estado superficial.

La realización del estudio mencionado se lleva a cabo en cualquier carretera que se desee evaluar, bien para determinar tareas de conservación o presentar propuestas de mejora. El usuario de una carretera juzga su calidad por la comodidad que tiene al transitar por ella (el IRI representa la calidad superficial, pero también a partir de este se estima la calidad de las capas que conforman un pavimento).

Para la evaluación de los pavimentos existen distintos equipos clasificados de acuerdo a su funcionamiento. Ha resultado fácil utilizar equipos de tipo respuesta por la ventaja principal de que operan a velocidades de circulación de vehículos estándar, lo que hace que la evaluación tome poco tiempo, además los resultados son bastante confiables.

En el presente trabajo se describe el diseño y construcción de un equipo tipo respuesta de bajo costo basado en instrumentación virtual y el proceso de calibración. En la medición del IRI intervienen dos variables, desplazamiento vertical y velocidad. Estas permiten conocer el valor de IRI de una carretera.

Palabras clave: IRI, equipo tipo respuesta, instrumentación virtual, variable, calibración,

Abstract

Because pavement irregularities caused by its operation and environmental agents presented, as well as influencing the construction process and quality of materials, it is necessary to conduct studies of the International Roughness Index (IRI) to evaluate the surface state.

The study it is executed in any road that need evaluation, as well to present conservation works or make suggestions for improvement. The user of a highway judge the quality of that in base to the comfort that sense during the travel (IRI represents the surface quality, but also from the quality of the layers that make up a pavement is estimated).

For the evaluation of pavements are different teams ranked according to their performance. It has been easy to use equipment like response type by the main advantage of operating at speeds of standard vehicles, which makes an easy evaluation.

In this paper it is described the design and construction of a response type equipment measurement of low cost based on virtual instrumentation and is described the calibration process. In the measurement of IRI involves two variables, vertical displacement and velocity. These provide information about the value of IRI a road.

Glosario

IRI	Índice de Rugosidad Internacional
IP	Índice de Perfil
RTRRMS	Response Type Road Roughness Measuring System
AASHO	American Association of State Highway Officials
PSI	Present Serviceability Index
ISA	Índice de Servicio Actual
IRRE	Internacional Road Roughness Experiment
QCS	Quarter Car Simulation
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
ARS	Average Rectified Slope
RN	Número de Recorrido
BPR	Rugosímetro del Bureau of Public Roads
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
RPUG	Road Profiler User's Group
FHWA	Federal Highway Administration
HPMS	Highway Performance Monitoring System
IV	Instrumento Virtual
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
PC	Computadora Personal

Introducción

El transporte terrestre es el principal medio para el desplazamiento de personas y cargas. Es de fundamental importancia tener carreteras seguras y cómodas durante cualquier época del año, que además éstas sean duraderas. Para que una carretera cumpla con su vida útil de diseño, requiere de mantenimiento y conservación periódica, después de su construcción.

Para lograr los objetivos de diseño de las carreteras es necesario realizar evaluaciones con cierta frecuencia para monitorear su estado y verificar que estas cumplan con el propósito para el cual fueron construidas.

A lo largo de la historia se han desarrollado parámetros de evaluación del estado superficial de las carreteras para garantizar que presten un servicio adecuado, uno de éstos y quizás el más importantes es el Índice Internacional de Rugosidad (IRI, por sus siglas en inglés), producto del estudio patrocinado por el Banco Mundial en los años 80's, utilizado a nivel mundial en la actualidad. Este índice es un valor numérico expresado en m/km o mm/m, el cual indica las condiciones del pavimento, es decir, si éste se encuentra en condiciones de circulación óptimas o si presenta deterioros que afecten la dinámica del vehículo, velocidad de circulación y le provoque sensación de inseguridad al usuario.

Cabe mencionar que una mala calidad en los trabajos de construcción provoca una disminución de la vida útil del pavimento, incrementando su velocidad de deterioro, por el contrario, una adecuada calidad en mencionada tarea, incrementa la vida útil del pavimento y, además, se disminuyen los costos de operación y de mantenimiento. El IRI es parte fundamental de una herramienta para el cálculo de los costos de operación.

Para determinar la rugosidad de un pavimento existe una gran variedad de equipos, los cuales se clasifican en cinco categorías de acuerdo a su funcionamiento; perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros, perfilógrafos, perfiladores de peso ligero, dispositivos manuales y sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta.

El presente proyecto se centra en el diseño y construcción de un equipo tipo respuesta, basado en una tarjeta de adquisición de datos para la medición del IRI.

Justificación

En México las carreteras no cuentan con las mejores condiciones de servicio, de hecho, la mayoría de ellas están catalogadas por las propias autoridades como pavimentos en regulares y malas condiciones. Una razón importante por la cual presentan bajo nivel de servicio se debe a la antigüedad de éstas, ya que la mayoría se proyectaron, diseñaron y construyeron entre los años de 1925 a 1970.

Por otra parte, la red fue proyectada para soportar cargas vehiculares entre las 6 y 8 toneladas. En la actualidad se llegan a tener camiones que ya con carga alcanzan hasta 60 toneladas o incluso un tanto más. Además de no considerar el aumento en los pesos vehiculares, tampoco se consideró el crecimiento del tránsito de camiones pesados.

La inversión en infraestructura es importante para incrementar la productividad y competitividad económica de un país. La carencia de infraestructura adecuada impide el movimiento de mercancías y materias primas del lugar donde se producen a los centros de consumo y ocasionan el aislamiento de amplias zonas del país, así como el aumento en los costos de servicios y productos. (Mario C. Arriaga Patiño, 1998)

La inversión en infraestructura no debe postergarse, pues no se puede alcanzar el desarrollo de primer mundo con infraestructura del tercero, se deben igualar o superar estándares de los países competidores. De acuerdo al Informe de Competitividad Global 2014-2015 © 2014 Foro Económico Mundial (Schwad, 2014), México se encuentra en el sitio 52 en cuanto a la calidad de sus carreteras, de un estudio de 148 países. Lo que conlleva a las autoridades competentes a buscar optimización de recursos, aplicación de nuevas tecnologías y estrategias con las cuales se puedan mejorar la calidad de nuestros caminos.

Los usuarios de una carretera juzgan su calidad principalmente por la comodidad que tienen al transitar por ella. Desde el punto de vista de un usuario, caminos en mal estado significan incomodidad, reducción de la velocidad, daño potencial del vehículo y un mayor costo de operación.

El IRI es un parámetro altamente utilizado a nivel mundial para la evaluación de carreteras, que además es empleado para el cálculo de los costos de operación, correlacionable con el Índice de Perfil (IP). Éste es un parámetro de aceptación o

rechazo de las nuevas carreteras construidas, así como un factor para la evaluación de las mismas.

Para la medición del IRI existen varios equipos, clasificados de acuerdo a su funcionamiento. En México no se cuenta con equipos suficientes para evaluar toda la red federal cada que se requiere, debido a su elevado costo de adquisición.

La presente tesis se centra en el desarrollo de un equipo de bajo costo para la medición del IRI, de tipo respuesta, de instrumentación virtual, basada en una tarjeta de adquisición de datos.

Objetivo general

Diseñar y construir un equipo tipo respuesta para la medición del IRI basado en una tarjeta de adquisición de datos, reduciendo los costos de construcción de un equipo comercial aprovechando las bondades que brinda la instrumentación virtual.

Objetivos específicos

- Conocer y comprender el concepto de IRI.
- Diseñar un equipo tipo respuesta para la medición del IRI de bajo costo.
- Seleccionar los mejores sensores para la instrumentación.
- Construir un equipo para medición de IRI.
- Conocer y comprender el concepto de instrumentación virtual.
- Comprender el funcionamiento del software para el cálculo del IRI.
- Definir el proceso de calibración.

Capítulo I

Índice Internacional de Rugosidad

1.1. Antecedentes

La rugosidad es la característica más importante en las sensaciones de confort y seguridad que experimentan los usuarios al circular por una carretera. En la norma ASTM E867 *Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems* se define la rugosidad como: “*las desviaciones de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de marcha, cargas dinámicas y drenaje*”. También se puede definir como la distorsión de la superficie de la carretera, que provoca aceleraciones verticales indeseables en el vehículo, que contribuyen a un paseo incómodo.

En la década de 1920, ingenieros civiles instalaron dispositivos en vehículos para medir la rugosidad de las carreteras. Éstos fueron llamados rugosímetros y tienen distintos nombres genéricos, entre ellos: los *Response-Type Road Roughness Measuring System* (RTRRMS) ver el apartado 1.4., Response Type Systems y rugosímetros. En estos sistemas el vehículo puede ser un vehículo tipo van, un vehículo ligero o un remolque especial. Un rugosímetro es un transductor que recolecta los movimientos acumulados de la suspensión. El equipo más popular de este tipo es el *Mays Ride Meter* y varios modelos de fabricación casera. (Karamihas, 1998)

Tomando en cuenta que la rugosidad superficial de un pavimento es un factor de suma importancia para la comodidad y seguridad del usuario, la *American Association of State Highway Officials* (AASHO), en el desarrollo del proyecto AASHO *Road Test* en 1962, introdujo el concepto de serviciabilidad, el cual toma en

cuenta un parámetro denominado *Present Serviceability Index* (PSI), mejor conocido en México como Índice de Servicio Actual (ISA).

El ISA consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación y lo realiza un grupo o panel de evaluadores. Cada evaluador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5, correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie perfecta, respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores.

En la tabla 1.1 se muestra la escala del ISA y la calificación correspondiente a la condición del camino. Este método ayudó a estimar (de una manera subjetiva) las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en nuestro país, con rapidez y sin interrumpir el flujo de vehículos. (Mario C. Arriaga Patiño, 1998).

Tabla 1.1. Condición del camino respecto al ISA.

Fuente: Documento n. 45 del Banco Mundial.

ISA	CONDICIÓN DEL CAMINO
5	Muy bueno
4	Bueno
3	Regular
2	Malo
1	Pésimo
0	Intransitable

En la década de los 70's el Banco Mundial patrocinó varios programas de investigación de gran importancia, entre ellos se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de los pavimentos, para conocer los problemas en los países en vías de desarrollo. De ellos derivó que caminos con poca inversión en infraestructura resultan más costosos, debido a los precios que los usuarios pagan al circular por ellos y la inversión en mantenimiento. En el proyecto se detectó que los datos de rugosidad de distintos países no podían ser comparados, incluso los de un mismo país, puesto que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo. (Vargas, 2010).

La gran variedad de equipos utilizados para medir la rugosidad superficial y los numerosos índices y escalas existentes para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de

adoptar un "índice único". Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía limitar las futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos.

En 1982 el Banco Mundial financió el proyecto *Internacional Road Roughness Experiment* (IRRE) desarrollado en Brasil, en él participaron Inglaterra, Francia, Estados Unidos, Bélgica y Brasil. En éste proyecto se realizó la medición de la rugosidad superficial de pavimentos en distintas condiciones de calidad, con diferentes métodos y equipos. A partir de éste proyecto se seleccionó el parámetro de evaluación de rugosidad superficial denominado IRI. (Michal W. Sayers, 1986)

1.2. Definición

La definición teórica del IRI es la siguiente: "El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia promedio de la pendiente rectificada, producto de la simulación del modelo de cuarto de carro (*Quarter Car Simulation*, QCS), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h".

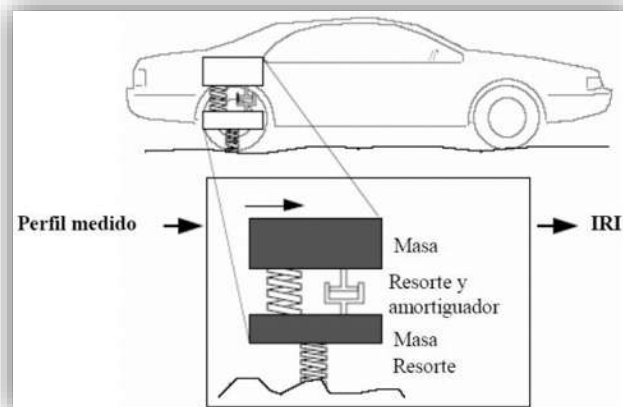


Figura 1.1. Modelo cuarto de carro.

Fuente: Documento n. 45 del Banco Mundial.

Así pues, se puede señalar que el IRI se estableció a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de los sistemas dinámicos, todo ello, con base en un modelo que simuló el movimiento de la suspensión acumulada por un vehículo al circular por una determinada longitud de perfil de la carretera, a una velocidad estándar de 80 km /h.

El IRI es un parámetro de calidad que indica el comportamiento actual y futuro del estado superficial de los pavimentos y que de alguna manera sustituya el método de la AASHO, ahora *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es por sensación, es decir, cualitativo (ISA) y el otro es medido, o sea, cuantitativo (IRI).

1.3. Criterios del Índice Internacional de Rugosidad

- **Estable en el tiempo.** El IRI debe ser definido por una rugosidad numérica que no debe cambiar con el tiempo. Ésta debe ser válida en cualquier tipo de superficie de pavimento y para todos los niveles de rugosidad. Para lograr este objetivo, del consenso de los investigadores profesionales determinan que el IRI debe ser definido por una función matemática del perfil longitudinal en vez de un equipo estandarizado. La función matemática, establece un estándar preciso del valor de la rugosidad para cualquier camino.
- **Portable.** Para que verdaderamente sea transportable, el IRI debe ser compatible con los métodos de medición de rugosidad disponibles en todas partes del mundo. En particular debe ser compatible con los métodos manuales para la obtención del perfil longitudinal (estadal y nivel, TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*) Beams) y también debe ser adecuado para el presente y futuro de perfilómetros de alta velocidad.
- **Reproducible.** El IRI debe ser una medida significativa de la rugosidad, que refleje las condiciones del camino que afectan al usuario, en términos del funcionamiento del vehículo, calidad de conducción y seguridad.

Sin lugar a dudas, el instrumento más popular utilizado para medir la rugosidad en todo el mundo hoy en día es el tipo RTRRMS. Al funcionar correctamente los rugosímetros son capaces de obtener una medida del

movimiento acumulado de la suspensión del vehículo, llamada pendiente rectificadora (ARS, *Average Rectified Slope*), que es relevante en las condiciones del camino puesto que afecta la respuesta de circulación del vehículo.

Cuando se realizaron evaluaciones con diferentes RTRRMS bajo mismas condiciones, se observó que los resultados de dichas mediciones son altamente correlacionables, que los errores que se presentan son más que nada en la repetibilidad y en el procedimiento más no en el equipo.

- **Válido.** Los procedimientos utilizados para medir el IRI deben asegurarse que los métodos utilizados con diferentes equipos se traducirán en la misma medida numérica de la rugosidad cuando se mida un mismo camino. (Michal W. Sayers, 1986)

1.4. Equipos para la medición de la rugosidad superficial

Los usuarios de una carretera juzgan su calidad principalmente por la comodidad que tienen al transitar por ella. Desde el punto de vista de un usuario, caminos en mal estado significan incomodidad, reducción de la velocidad, daño potencial del vehículo y un mayor costo de operación.

Una gran variedad de equipos ha evolucionado a lo largo de los últimos años para medir la rugosidad del pavimento; estos equipos varían entre los organismos viales. (R. W. Perea, 2002) encontraron que los dispositivos se pueden dividir en las siguientes cinco categorías:

- Perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros.
- Perfilógrafos.
- Perfiladores de peso ligero.
- Dispositivos manuales.
- Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta.

Los **perfiladores de alta velocidad** recogen información sobre el estado del pavimento a altas velocidades y registran datos suficientes para monitorear el perfil del pavimento. Los principales componentes de un perfilador de alta velocidad son sensores láser de altura, acelerómetros y un sistema de medición de distancia precisa. Los sensores se encargan de registrar la altura que hay entre la

superficie del pavimento al vehículo. Los acelerómetros, se ubican en la parte superior de los sensores de altura y se encargan de registrar la aceleración vertical del sensor. El perfil longitudinal se deriva entonces de estas dos mediciones de altura. El sistema de medición de distancia a las mediciones a un punto de partida de referencia. Los sensores de altura sin contacto se utilizan actualmente en los perfiladores ya sea láser o de ondas ultrasónicas. La figura 1.2 muestra un generador de perfiles típico de alta velocidad con 40 sensores láser.



Figura 1.2. Perfilador láser.

Fuente: Revista de ingeniería en construcción n.6, El IRI: Un indicador de la regularidad superficial.

Un **perfilógrafo** está formado por una viga o un marco rígido con un sistema de ruedas de apoyo en cada extremo y una rueda central (Figura 1.3). Esta rueda está unida a un equipo que registra el movimiento de la rueda desde el punto de la referencia establecida.



Figura 1.3. Perfilógrafo tipo California.

Fuente: Revista de ingeniería en construcción n.6, El IRI: Un indicador de la regularidad superficial.

La principal diferencia entre el perfilador de alta velocidad y la perfilógrafo es que utilizan diferentes planos de referencia y de filtrado para grabar el perfil de la superficie. El perfilador es un dispositivo de encuesta de la red carretera mientras, que los perfilógrafos son ampliamente utilizados para evaluar la uniformidad de la construcción de los pavimentos nuevos. Muchas agencias de carreteras usan el IP que se obtiene a partir de la medición del trazo de un perfil por un perfilógrafo, como la base para la aceptación de pavimentos nuevos como de sobrecarpetas. Estímulos y sanciones para nuevas construcciones de pavimentos también se basaban en el valor del IP.

Los **perfiladores de peso ligero** (Figura 1.4) se utilizan cada vez más para evaluar nuevas construcciones carreteras. El término de perfiladores ligeros se refiere a los dispositivos en los cuales el sistema de perfilamiento ha sido instalado en un vehículo ligero, como un carrito de golf o un vehículo todo terreno. El sistema de perfiles en los perfiladores de peso ligero es similar a los utilizados en perfiladores de alta velocidad. Los datos del perfil se utilizan comúnmente para generar un IP e identificar ubicaciones de baches. Los datos del perfil se pueden utilizar también para calcular otros índices de rugosidad, como el IRI o Número de Recorrido (RN).



Figura 1.4. Perfilador de peso ligero.

Fuente: Revista de ingeniería en construcción n.6, El IRI: Un indicador de la regularidad superficial.

Dispositivos manuales, como el nivel-estadal y el *Walking Profiler* (Figura 1.5) se utilizan generalmente para verificar o validar los datos recogidos por los perfiladores de alta velocidad. El nivel y estadal es quizás el método más preciso para la obtención de las verdaderas elevaciones a lo largo de una superficie del pavimento y su procedimiento de referencia estándar se describe en la norma ASTM E1364. Los perfiladores de nivel y estadal y el *Walking Profiler* por lo general utilizan un inclinómetro entre dos patas de apoyo o varias ruedas para calcular el perfil de la superficie. El procedimiento general para verificar la salida de los perfiladores, es utilizar dispositivos manuales para la obtención de los datos del perfil en las secciones de prueba existentes, en seguida calcular un índice de rugosidad a partir de los datos y comparar el resultado con el obtenido con los perfiladores de alta velocidad. (Ignacio Sánchez, 1989)



Figura 1.5. Walking Profiler.

Fuente: Revista de ingeniería en construcción n.6, El IRI: Un indicador de la regularidad superficial.

Los **equipos tipo respuesta (RTRRMS)**, evalúan la rugosidad del camino mediante la respuesta dinámica del vehículo al circular por una superficie de pavimento a una velocidad dada. Éstos miden los movimientos verticales que tiene el eje trasero del vehículo. Los equipos tipo respuesta pueden ser cualquier automóvil estándar o un remolque de un solo eje. (H., 1990)

Los RTRRMS constan, en general, de tres partes: un vehículo o remolque en el que se realizan las mediciones, 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*". Una vez realizada la auscultación del tramo carretero, el equipo entrega un coeficiente que es proporcional a la velocidad vertical relativa media de la suspensión del vehículo en el tramo de ensayo. (Ignacio Sánchez, 1989)

Las principales ventajas de los equipos tipo respuesta son:

- Bajo costos de operación, las mediciones de la rugosidad se realizan a altas velocidades (por lo general a 80 km/h), por lo tanto, se miden longitudes considerables en muy poco tiempo.

- Los datos de rugosidad son razonablemente exactos y reproducibles. (H., 1990)

Cabe mencionar que los resultados están influenciados por las características de la suspensión del vehículo o remolque y la velocidad de medición.

Entre los equipos más conocidos de tipo respuesta destacan el: *May's Ride Meter* y el rugosímetro del *Bureau of Public Roads* (BPR).

El *May's Ride Meter* (Figura 1.6) es un equipo tipo respuesta fabricado por la compañía Rainhard. Éste equipo utiliza dos sensores, uno para obtener la rugosidad y otro para obtener la velocidad, éste último va conectado al velocímetro del vehículo que lo remolca. El sensor para obtener la rugosidad utiliza un codificador óptico para producir pulsos eléctricos que son mecánicamente acumulados por un motor de un paso, conectado a una graficadora.



Figura 1.6. Vista lateral del May's de una la Unidad Regional de Servicios Técnicos.

Aunque el sensor para obtención de la rugosidad trabaja apropiadamente en carreteras de todos los niveles de rugosidad, el motor tiene sus límites de respuesta, lo cual ocasiona que los conteos obtenidos no sean correctos a altos niveles de rugosidad. (Montenegro, 1999)

El *rugosímetro BPR* mostrado en la figura 1.7, reconocido como el dispositivo más rápido para la determinación de la rugosidad disponible en su momento. Consiste de un remolque de una sola rueda que se remolca por un automóvil o por un camión ligero a una velocidad de 30 km/h. La rueda se encuentra montada en

resortes soportados por la estructura del remolque. Los contornos de la superficie del pavimento causan que la rueda censora oscile verticalmente con respecto a la estructura. El movimiento vertical es acumulado usando un integrador numérico, proporcionando estadísticas de la rugosidad en pulgadas por milla.



Figura 1.7. Rugosímetro del Departamento Público de Carreteras (BPR).

Después de algún periodo de uso, este sistema se vuelve muy susceptible a los cambios en la temperatura, a la condición de la superficie donde opera y a otros factores mecánicos. En adición, tiene un problema de frecuencia de resonancia que, si es excitado, produce resultados erróneos. Las vibraciones eran notadas a niveles de rugosidad elevados. Como resultado, su uso gradualmente ha ido disminuyendo.

1.5. Factores que influyen en la medición de la rugosidad superficial

Existe una gran variedad de equipos disponibles para la medición de la rugosidad del pavimento. Se tiene el sentimiento generalizado de que al medir con diferentes equipos el mismo tramo se obtendrán resultados distintos, esto se debe a errores o discrepancias, variaciones en los dispositivos, procedimientos de medición inadecuados y aspectos propiamente de la superficie de los pavimentos y el medio ambiente.

En la Universidad de Michigan en el Instituto de Investigación del Transporte se realizaron estudios para entender el resultado de los factores que afecta la calidad de medición del perfil y en definitiva a la rugosidad medida. Estos factores fueron estudiados mediante experimentos especializados, el resto fue cubierto a partir de datos que estaban disponibles a partir de investigaciones anteriores; análisis teóricos o la información proporcionada en la literatura.

El Panel del *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) que supervisó este proyecto proporcionó una lista de factores. Hubo un aumento de la lista debido a la experiencia previa del equipo de investigación en estudios tales como la Reunión de Ann Arbor *Road Profilometer* en 1985; en 1993 y 1994 el *Road Profiler User's Group* (RPUG), una encuesta realizada por la *Federal Highway Administration* (FHWA) sobre la "interpretación de los datos de la rugosidad del perfil del camino", discusiones con los asistentes a las reuniones RPUG y conversaciones telefónicas y correspondencia por correo electrónico con varios fabricantes de perfiladores. También se han añadido algunos factores al estudio después de que los investigadores los encontraron durante el trabajo experimental, o cuando los operadores de perfiladores que participaron en los experimentos expresaron su preocupación por ellos.

Los factores abordados en dicha investigación se dividen en cinco grandes categorías:

- Diseño de perfiles.
- Forma de la superficie.
- Entorno de medición.
- Manejo de perfiles.
- Conductor y de competencia del operador.

La mayoría de los últimos estudios se han centrado en el efecto de diseño de los perfiles y en la precisión de la medición.

Cada uno de los factores de la medición del perfil afecta el rendimiento de perfiles en una o de cuatro maneras (Tabla 1.2).

1. Precisión: A la mayoría de los factores le afecta la precisión de la medición del perfil, la consecuencia es un sesgo en el valor de rugosidad.
2. Acuerdo: Algunos factores influyen en el acuerdo entre los perfiladores. Se difiere en la precisión ya que ninguna norma figura la posición de sensores. Por ejemplo, dos perfiladores que difieren en el espaciamiento del sensor lateral pueden ambos perfiles medir con precisión, pero en valores diferentes de rugosidad, porque no miden en las mismas posiciones. Dado que no existe norma para el espaciamiento de sensor, ni de perfiles, no se puede considerar uno más correcto que el otro.
3. Repetibilidad: Varios de los factores, en particular los aspectos de forma del pavimento y operación de perfiles, les afecta la capacidad de repetición de un perfilador, es decir, que causan dispersión en los valores de rugosidad que se miden en ensayos repetidos.
4. Interpretación: Algunos de los factores que se relacionan con la interpretación de las mediciones de rugosidad. Estos factores no afectan el acuerdo entre perfiladores o mediciones repetidas por el mismo perfilador, pero afectan el sentido de la medición. (S. M. Karamihas and T. D. Gillespie, 1999)

Tabla 1.2. Factores que influyen en la medición de la rugosidad carretera.

Factor	Precisión	Acuerdo	Repetitividad	Interpretación	Factor	Precisión	Acuerdo	Repetitividad	Interpretación
Diseño del Perfil	X	X		X	Medición Ambiental	X			
Intervalo de muestra	X				Viento	X			
Cálculo del Algoritmo	X				Temperatura	X			
Comprobación Automatizada de Errores	X				Humedad	X			
Sensores de Altura	X				Humedad Superficial	X			
Acelerómetros	X	X			Contaminantes de la Superficie	X			
Medición de Distancia Longitudinal	X				Marcas del Pavimento	X			
Número de Sensores				X	Color del Pavimento	X			
Espaciado Lateral del Sensor		X			Luz Ambiental	X			
Forma de la Superficie	X		X		Operación del Perfil	X		X	X
Variaciones Transversales			X		Velocidad de Operación	X			
Variaciones Diarias			X		Cambios de Velocidad	X			
Variaciones Estacionales			X		Posición Lateral			X	
Textura de la Superficie	X				Deducción			X	
Deterioro del Pavimento	X		X		Posición Longitudinal			X	
Curvas	X				Longitud del Segmento				X
Grados y Subidas	X				Frecuencia de Colección de Datos				X
					Comprobaciones de Sanidad del Perfilador	X			
					Conductor y Operador del Perfil	X		X	

Capítulo II

Materiales y métodos

El IRI es el índice del perfil de mayor uso hoy en día para evaluar la rugosidad de las redes carreteras. El IRI fue desarrollado a inicios de la década de los 80's, como parte de un estudio que fue patrocinado por el Banco Mundial. Diversos países han adoptado al IRI como parámetro para monitorear la rugosidad de sus redes carreteras. Los tres índices del perfil más comunes que están actualmente en uso son el IRI, RN y el IP.

El RN es una estadística del perfil que fue primeramente desarrollada a inicios de la década de los 80's como resultado de una investigación conducida para dos estudios del NCHRP realizadas por el Dr. Janoff. El RN es un parámetro que se encuentra relacionado estrechamente para la clasificación que dan los usuarios de las carreteras a la sección de un camino. (Karamihas, 1998)

Diversos países tienen especificaciones para la aceptación de pavimentos nuevos. El equipo que actualmente tiene mayor uso para la medición en pavimentos nuevos es el perfilógrafo. La medición del trazo del perfil realizado por el perfilógrafo es usada para calcular el IP del pavimento. El IP se usa como parámetro para la aceptación de pavimentos de nueva construcción, así como para la determinación de estímulos y sanciones, éste es correlacionable con el valor de IRI.

2.1. Escala y características del IRI

El IRI es la relación de mediciones de rugosidad estandarizadas obtenidas de los RTRRMS, con unidades recomendadas de: metros por kilómetro (m/km), milímetros por metro (mm/m) = (pendiente) (1000). La referencia usada para el IRI en los RTRRMS es un modelo matemático llamado cuarto de carro, que se encuentra en forma de programa de cómputo aplicado a la medición de perfiles.

El modelo matemático usado para definir el IRI es el mismo que se describe en el reporte 228 de la NCHRP de 1981, con la única diferencia de que el IRI es calculado independientemente para cada rodada. El modelo del reporte 228 de la NCHRP fue calculado simultáneamente para las dos rodadas, de esta manera se reproduce el funcionamiento del RTRRMS basado en un vehículo de pasajeros o en un remolque de un solo eje.

La principal característica del perfil que define el IRI es que puede ser medido por la mayoría de los métodos perfilométricos (más que cualquier otro perfil). El IRI es tan compatible con las mediciones obtenidas con los RTRRMS que éstos pueden calibrarse a la escala del IRI para obtener la mejor exactitud (o muy cercana a la mejor). El IRI se relaciona estrechamente con las opiniones subjetivas que tiene el público de la rugosidad del camino, debido a que:

1. Se puede medir por variados métodos perfilométricos.
2. Tiene una fuerte correlación con las medidas de los RTRRMS
3. Tiene una fuerte correlación con las opiniones subjetivas, que es una escala altamente transportable. (López, 2007)

El modelo del QC utilizado en el algoritmo de cálculo del IRI es justo lo que su nombre indica: una cuarta parte de un coche. El modelo se muestra esquemáticamente en la figura 2.2: incluye un neumático, representado con un resorte vertical, la masa del eje apoyado por el neumático, el resorte y amortiguador de la suspensión, y la masa del cuerpo soportada por la suspensión para el neumático. (Karamihas, 1998)

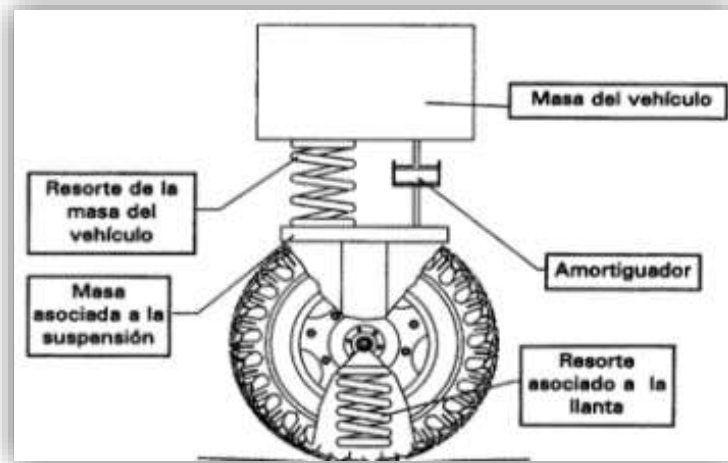


Figura 2.2. Representación gráfica del modelo cuarto de carro.

Fuente: Documento n. 45 del Banco Mundial.

El rango de la escala del IRI para caminos pavimentados es de 0 a 12 m/km., donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable, para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 20. En la figura 2.3 se muestra la propuesta de escala de la medición de la rugosidad del estudio realizado por el Banco Mundial, en cada escala se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas en diversos países. (Michal W. Sayers, 1986)

El IRI es un valor numérico que resume la calidad de la rugosidad que impacta en la respuesta del vehículo. Él es IRI es apropiado cuando se desea medir la rugosidad para relacionarla con:

- Gastos de operación vehicular.
- Calidad de viaje.
- Condición de la superficie.

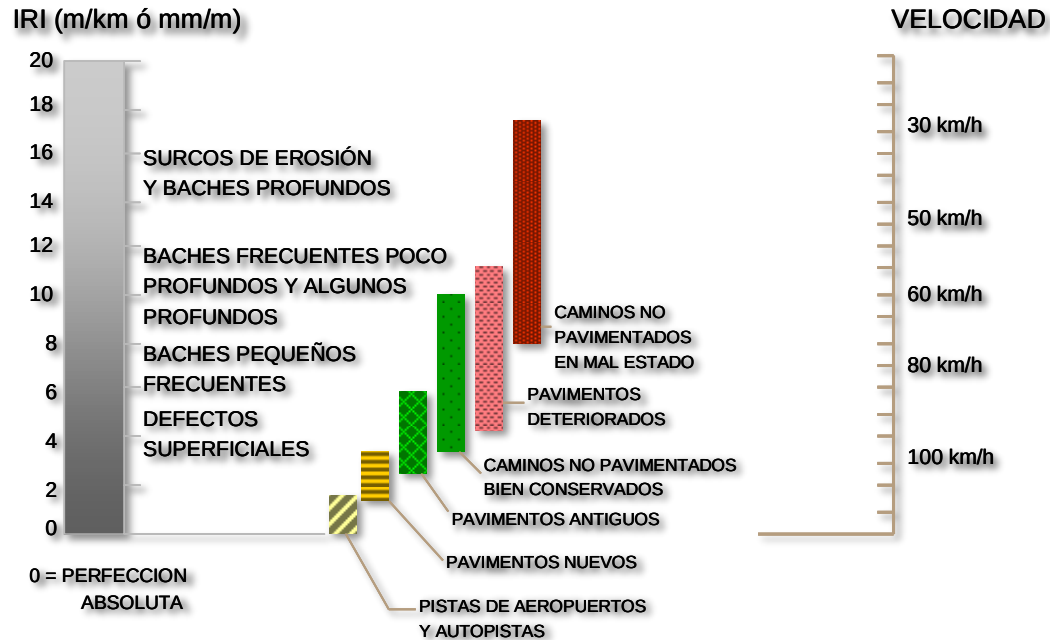


Figura 2.3. Escala de rugosidad en base al IRI.

Fuente: Documento n. 45 del Banco Mundial.

2.2. Medición del IRI

El proceso de medición del IRI se basa en las Normas de ASTM E 950 “*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*”, la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil, medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM E 1170 “*Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces*” la cual describe el cálculo de la respuesta vehicular a la regularidades de la carretera.

Es importante mencionar que el IRI es un indicador independiente del equipo con que se mide, éste depende únicamente de la medida de los datos de entrada en la elevación del perfil longitudinal. Debido a la variedad de equipos existentes, es necesario se definan los requisitos del perfil longitudinal.

Es recomendado que el valor del perfil longitudinal sea reportando en un intervalo de 250 mm (intervalo de almacenamiento según ASTM E 950-98), que permita

calcular el IRI con la precisión, exactitud y frecuencia requerida. Y un intervalo de medición vertical (resolución de las medidas verticales según ASTM E 950-98) menor o igual a 0.1 mm (0.005 in). Los equipos que se utilicen deben asegurar una medición del perfil longitudinal que sea precisa, exacta y reproducible, de forma que aseguren comparaciones confiables.

Debe tomarse en cuenta lo establecido en el Apéndice E del Highway Performance Monitoring System (HPMS) *Field Manual ("Measuring Pavement Roughness")* del Office of Highway Policy Information de la FHWA, el cual menciona que los valores de IRI deben tomarse cuando existan condiciones climáticas adecuadas, preferiblemente cuando la superficie de la carretera se encuentre seca. Así mismo, la medición deberá determinarse en sectores homogéneos, que corresponden a un pavimento de estructuración uniforme y que no esté dividido por puentes, líneas férreas, cruces de calles y otros que puedan alterar el perfil longitudinal del camino e incrementar el valor del IRI.

La administración debe establecer tramos de control, monitorearlos constantemente con datos de la medición y cálculo del IRI. Los cuales sirven para comparaciones, verificaciones y certificaciones de equipos de medición.

La longitud del tramo a medir es importante para la determinación del IRI, es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles puntuales altos de rugosidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada los valores de IRI. (López, 2007)

2.2.1. Algoritmo de cálculo del IRI

El cálculo del IRI se realiza por medio de cuatro variables que están en función de la simulación de la respuesta dinámica de un vehículo de referencia (cuarto de carro), que viaja sobre el perfil del camino en estudio.

Las ecuaciones de las cuatro variables son resueltas para cada punto excepto para el primero (cuando $x = 0$). La pendiente obtenida entre la primera elevación y la elevación a los 11 m es utilizada para inicializar las variables que se presentan a continuación:

$$Z1' = Z3' = \frac{Ya - Yi}{11} \quad (1)$$

$$Z2' = Z4' = 0 \quad (2)$$

$$a = \frac{11}{dx} \quad (3)$$

Donde:

$Z1', Z2', Z3'$ y $Z4'$ son las cuatro variables.

Ya representa la elevación del perfil a los 11 m.

Yi es la elevación en el primer punto.

dx es el intervalo de muestreo.

Por ejemplo, si el intervalo $dx = 0.5$ m, la ecuación (1) será la diferencia de elevaciones entre el punto 23 y el punto 1 entre 11, debido a que la ecuación (3) será: $a = (11 / 0.5) + 1 = 23$, y establecer una pendiente inicial para el cálculo del IRI usando los datos del perfil de estudio.

Para cada punta de elevación, desde 2 hasta "n" (n = número de elevaciones medidas), las siguientes cuatro ecuaciones son utilizadas:

$$Z1 = S11 * Z1' + S12 * Z2' + S13 * Z3' + S14 * Z4' + P1 * Yp \quad (4)$$

$$Z2 = S21 * Z1' + S22 * Z2' + S23 * Z3' + S24 * Z4' + P2 * Yp \quad (5)$$

$$Z3 = S31 * Z1' + S32 * Z2' + S33 * Z3' + S34 * Z4' + P3 * Yp \quad (6)$$

$$Z4 = S41 * Z1' + S42 * Z2' + S43 * Z3' + S44 * Z4' + P4 * Yp \quad (7)$$

Donde:

$$Yp = (Yi - Yi - 1) / dx = \text{pendiente de entrada} \quad (8)$$

$$Zj' = Zj \text{ de la posición anterior, para } j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

Sij, Pj = Coeficientes que están en un arreglo para un intervalo de muestra dado.

Así, las ecuaciones (4) a (7) están resueltas para cada posición a lo largo de la huella de la llanta y la ecuación (9) es utilizada para obtener los valores de $Z1'$, $Z2'$, $Z3'$ y $Z4'$ para la siguiente posición. Así, para cada posición la pendiente rectificadora (RS) de un perfil filtrado es calculada como:

$$RS_j = I Z1 - Z3 I \quad (10)$$

La ecuación anterior debe ser resuelta para todos los puntos del perfil de estudio, El IRI es calculado como:

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum RS_i \quad (11)$$

EL IRI estadístico es el promedio de la pendiente rectificadora sobre el tramo de prueba.

Los coeficientes S_{jj} y P_j son constantes que se encuentran en un arreglo para un intervalo de tiempo, de donde el tiempo será el que necesite un vehículo para recorrer una distancia de un perfil en estudio para la velocidad de simulación.

Estos coeficientes han sido calculados para cada intervalo de muestreo por el Banco Mundial.

Descripción del programa:

El programa se especifica para un intervalo $dx = 0.25$ y fue realizado por el Banco Mundial, se encuentra en lenguaje "BASIC" debido a la facilidad de ser ejecutado en cualquier microcomputadora. Sin embargo, los comandos en el lenguaje "BASIC" varían de acuerdo con cada máquina y para ello puede ser necesario modificar algunas instrucciones. Este programa se describe a continuación:

a) EL programa calcula el valor del Índice Internacional de Rugosidad, a partir del perfil del camino realizado por un levantamiento topográfico de una rodada, para un intervalo de muestra (dx) seleccionado, que se encuentra entre 0.10 y 0.60 m, siendo las más comunes para el cálculo las de 0.25 y 0.50 m para una longitud de tramo de estudio no mayor de 600 m. La elección entre 0.25 y 0.50 m es debido a que el Banco Mundial indica que con la primera se tiene mejor precisión de las deformaciones en el pavimento, sin embargo se ha observado que no existe diferencia significativa en el resultado del IRI con respecto a utilizar $dx = 0.50$, no así el trabajo del levantamiento y el manejo de datos, por lo que es mejor trabajar con el intervalo de cincuenta centímetros.

b) De las líneas 1030 -1140 se inicializan las constantes y se lee la matriz de transición de estado ST (4 x 4) para cada uno de los intervalos de muestra dx, (especificado en la línea 1510), lo mismo hace para el vector PR (4 x 1), estos valores se encuentran entre las líneas 1520 -1550 Y dependen del intervalo de muestra. Para éste programa (Figura 2.4) el intervalo es de 0.25 m.

Nota: Debido a la forma de leer los datos, en las líneas 1520 a la 1550 se encuentran unidos los datos de la matriz ST y el vector PR de la siguiente manera:

Línea 1520 ST₁₁, ST₁₂, ST₁₃, ST₁₄, PR₁

Línea 1530 ST₂₁, ST₂₂, ST₂₃, ST₂₄, PR₂

Línea 1540 ST₃₁, ST₃₂, ST₃₃, ST₃₄, PR₃

Línea 1550 ST₄₁, ST₄₂, ST₄₃, ST₄₄, PR₄

```

1000 REM Programa para calcular el IRI
1030 REM Inicializar constantes
1040 DIM Y (26), Z (4), Z1 (4), ST (4,4), PR (4)
1050 READ DX
1060 K = INT (.25/ DX + .5) + 1
1070 IF K < 2 THEN K = 2
1080 BL = (K - 1) * DX
1090 FOR I = 1 TO 4
1100 FOR J = 1 TO 4
1110 READ ST (I, J)
1120 NEXT J
1130 READ PR (I)
1140 NEXT I
1150 REM Inicializar variables
1160 INPUT "Elevación del perfil cuando x = 11 m?", Y (K)
1170 INPUT " Cuando x= 0, cuales la elevación?", Y (1)
1180 Z1 (1) = (Y (K) - 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 Entrada de las elevaciones del perfil
1260 I = I + 1
1270 PRINT "X = "; IX * DX,
1280 IX = IX + 1
1290 INPUT "Elevación = "; Y (K)
1300 REM Cálculo de la pendiente de entrada
1310 IF IX < K THEN Y (DX) = Y (K)
1320 IF IX < K THEN GOTO 1270
1430 NEXT J
1440 FOR J = 1 TO 4
1450 Z1 (J) = Z (J)
1460 NEXT J
1470 RS = RS + ABS (Z (1) - Z (3))
1480 PRINT "DESPLAZAMIENTO ="; RS * DX; "IRI ="; RS / I
1490 GOTO 1260
1500 END
1510 DATA 0.25
1520 DATA .9966071, .01091514, -.002083274, .0003190145,
.005476107
1530 DATA -.5563044, .9438768, -.8324718, .05064701,
1.388776
1540 DATA .02153176, .002126763, .7508714, .008221888,
.2275968
1550 DATA 3.335013, .3376467, -.39.12762, .4347564,
35.79262

```

Figura 2.4. Pseudocódigo para cálculo del IRI.

Fuente: Publicación técnica n. 108 del IMT.

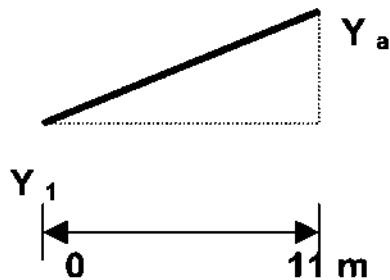
Para $dx = 0.25$ m.

$$RT = \begin{pmatrix} 0.9966071 & -0.5563044 & -2.083274E-03 & 3.190145E-04 \\ -0.5563044 & 0.9438768 & -0.8324718 & 5.0647014E-02 \\ 2.153176E-02 & 2.126763E-03 & 0.7508714 & 8.221888E-03 \\ 3.335013 & 0.3376467 & -39.12762 & 0.4347564 \end{pmatrix}$$

$$PR = \begin{pmatrix} 0.9966071 \\ -0.5563044 \\ 2.153176E-02 \\ 3.335013 \end{pmatrix}$$

c) De las líneas 1150 -1240 se inicializan variables. En la línea 1160 y 1170 se solicita la elevación Y (K) para cuando $x = 11$ m. y $x = 0$, Y (1) primera elevación, esto es para calcular la pendiente que existe entre ambos puntos y sirve para inicializar las variables de entrada. De la ecuación (1):

$$Z1' = Z3' = \frac{Ya - Yi}{11}$$



Donde $a = 11/dx + 1$

Para $dx = 0.25$ m $Ya = Y_{45}$

En el programa, las ecuaciones (1) y (2) quedan representadas por las líneas 1180 - 1210 de la siguiente manera:

$$Z1(1) = Z1(3) = (Y(K) - Y(1) \gg 111$$

$$Z1(2) = Z1(4) = 0$$

Nota: Los valores de las elevaciones Y (K) en este programa son dados en unidades de milímetros y el intervalo de muestreo dx están en metros, por lo que el IRI

resultante estará en unidades de mm/m, que son equivalentes a las unidades m/km.

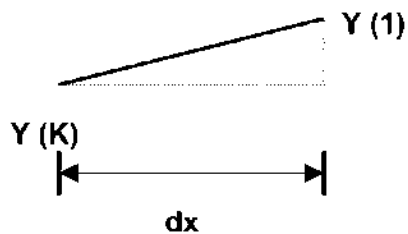
d) De las líneas 1250 -1290 se tiene la entrada de los valores del perfil. Como se explicó en la nota anterior las elevaciones estarán dadas en mm y se introducirás para cada intervalo de muestreo desde $x = dx$ (en metros).

e) De las líneas 1300 -1360 se calculan las pendientes de entrada.

De la ecuación (8), la pendiente de entrada YP es la diferencia de los valores de la elevación Y (K) (elevación en el punta actual) menos la elevación del punta anterior Y (1) dividido entre el intervalo de muestreo dx.

Representada esta ecuación en la línea 1330 como:

$$YP = (Y(K) - Y(1)) / dx$$



Donde Y (1) es un almacén temporal que guarda la elevación del punto anterior al evaluado Y (K).

f) En las líneas 1370 -1490 se efectúa la simulación del vehículo (cálculo del IRI).

Las variables utilizadas en el programa son cuatro variables de estado del vehículo en el arreglo de Z (Z1, Z2, Z3 y Z4). Obtenidas mediante las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) calculadas en la línea 1410, mediante un ciclo de "J" desde 1 hasta 4:

$$Z(J) = Z(J) + ST(J, JJ) * Z1(JJ)$$

Los coeficientes utilizados Z son derivados de las propiedades dinámicas del modelo de vehículo referido (cuarto de carro). Estas propiedades dinámicas están descritas por cuatro ecuaciones diferenciales, las cuales tienen la siguiente forma:

$$dz(t)/dt = A * z(t) + B * y(t)$$

Donde z es un vector que contiene las cuatro variables de Z, A es la matriz de estado de transición (4 x 4) que describe los movimientos dinámicos del modelo; B es un vector (4x 1) que describe como el perfil interactúa con el vehículo y, y (t) es el perfil de entrada.

La pendiente rectificada (RS: *Rectified Slope*) es la sumatoria del valor absoluto de la diferencia de las variables Z (1) y Z (3), así, la ecuación 10 queda como:

$$RS = \sum |Z(1) - Z(3)|$$

Representada en el programa en la línea 1470 como:

$$RS = RS + \text{ABS}(Z(1) - Z(3))$$

El IRI es calculado como la sumatoria de la pendiente rectificada dividida entre el número de puntos evaluados en el perfil. En el punto $x = 0$ no se obtiene la pendiente rectificada porque no existe elevación anterior, por lo que la ecuación (11) queda:

$$RS = \frac{1}{n-1} \sum RS$$

Representada en la línea 1480 como:

$$IRI = RS / I$$

Donde "I" es el número de elevaciones del perfil menos uno ($n - 1$)

EL IRI está en unidades de m/km. = mm/m.

Es de hacerse notar que el programa de cálculo del IRI con las mediciones del nivel y estatal desarrollado por el Banco Mundial, consiste en evaluar tramos (menores de 600 m) y hacer pasar por dichos tramos los equipos de medición de rugosidad con su escala propia y establecer una correlación de este equipo con la escala del IRI. Esto obliga a las empresas que cuentan con equipos de tipo respuesta a hacer calibraciones individuales y periódicas de acuerdo al trabajo programado. También se debe realizar la calibración si se modificó o cambio algún elemento que afecte el resultado del equipo (ejemplo: Llantas, suspensión, reparación de la consola, etc.). (Mario C. Arriaga Patiño, 1998)

Capítulo III

Estructura general del instrumento para medición del IRI

3.1. Estructura general de un instrumento

Un instrumento de medición es un aparato que permite comparar magnitudes físicas por medio de un proceso de medición. Estos instrumentos deben ser precisos y sensibles, como las balanzas, los cronómetros, las reglas, los termómetros, los barómetros y los velocímetros.

En general un instrumento de medición consta de un sistema determinado, donde la variable a medir es la que define el tipo de transductor o sensor a emplear, los sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas son tan elevados que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente, en la tabla 3.1 se muestran tres criterios de clasificación, así como clases y ejemplos. (Areny, 1998)

Tabla 3.1. Clasificación de los sensores y algunos ejemplos según Ramón Pallas Areny.

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

En la figura 3.1, se muestra una posible disposición de los elementos activos en un instrumento de medición, se incluyen todas las funciones básicas que se consideran necesarias para la descripción de cualquier instrumento.

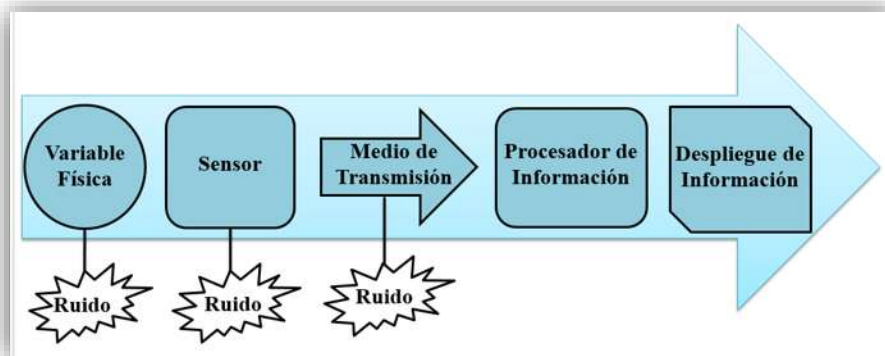


Figura 3.1. Estructura general de un instrumento.

Una variable es una característica que puede tomar diferentes valores en un determinado tiempo. En todo proceso se tienen variables, que afectan a las entradas o salidas del proceso. Temperatura, nivel, flujo y presión son las variables más comunes en los procesos industriales, las cuales en la actualidad pueden ser monitoreadas y controladas por medio de la instrumentación virtual. (Areny, 1998) En el presente proyecto se miden las variables de; desplazamiento, velocidad y aceleración (en el sentido “x”, “y” y “z”).

El sensor es el que primero recibe energía de la variable física y produce una salida. Es importante notar que un instrumento siempre extrae alguna energía de la variable física; por tanto, la cantidad resulta siempre alterada en el acto de la medición, es decir, se presenta un ruido siendo la causa de que una medida perfecta resulte teóricamente imposible. Los instrumentos se proyectan de manera que disminuyan al mínimo este efecto, pero es sabido que este siempre se presenta en menor o mayor grado. El sensor es el elemento encargado de acondicionar la señal en forma de voltaje (magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos).

Cuando los elementos funcionales de un instrumento están separados materialmente, es necesario transmitir los datos de uno a otro. Al elemento que ejecuta esta función se le llama elemento transmisor de datos. Básicamente se trata de un cable, a través del cual viaja la información.

Al ejecutar su trabajo un instrumento de medición puede requerir que una señal representada por alguna variable física se manipule de alguna manera. Por manipulación se entiende, específicamente, un cambio en valor numérico de acuerdo con alguna regla definida, pero conservando la naturaleza física de la variable. Ejemplo un amplificador electrónico acepta una señal de pequeño voltaje como entrada y produce una señal de salida que es también en voltaje, pero es un número constante de veces mayor que la entrada.

Si la información referente a la variable medida se va a comunicar a los seres humanos para monitorización, control o análisis, debe ponerse en una forma que pueda reconocer alguno de los órganos de los sentidos. Esta función incluye la simple indicación de un índice moviéndose en una escala, y también el registro de un instrumento de escritura moviéndose en una hoja de registro.

3.2. Instrumentación virtual

La realización de una medida requiere la intervención de varios instrumentos, unos que generan estímulos sobre el dispositivo que se pretende medir y otros que recojan la respuesta a estos estímulos. Este conjunto de instrumentos que hace posible la realización de la medida recibe el nombre de sistema de instrumentación.

Todo sistema de instrumentación consta de unas herramientas, un sistema de interconexión de estos instrumentos y un controlador inteligente que gestiona el funcionamiento de todo el sistema y da las órdenes para que una medida se realice correctamente.

El objetivo de la instrumentación virtual es sustituir y ampliar elementos del hardware por otros en el software, para ello se emplea un procesador que ejecute un programa específico, éste programa se comunica con los dispositivos para configurarlos y leer sus medidas. En muchas ocasiones el usuario final del sistema de instrumentación sólo ve la representación gráfica de los indicadores y botones de control virtuales en la pantalla del ordenador.

El concepto de “instrumentación virtual” va más allá de la simple medición de corriente o voltaje. También involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas. Con éstas, mediante software que permitan la implementación de algoritmos de control, es posible integrar y controlar complicados procesos. El Instrumento Virtual (IV) no se conforma con la adquisición de la señal, sino que también involucra la interfaz hombre-máquina, las funciones de análisis y procesamiento de señales.

La instrumentación virtual es un concepto introducido por la compañía *National Instruments* (2001). En el año de 1983, Truchard y Kodosky, de *National Instruments*, cuando decidieron enfrentar el problema de crear un software que permitiera utilizar la computadora personal (PC) como un instrumento para realizar mediciones. A este software le dieron el nombre de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, más comúnmente conocido por las siglas LabVIEW. LabVIEW, el primer software empleado para diseñar instrumentos en la PC, es un software que emplea una metodología de programación gráfica, a diferencia de los lenguajes de programación tradicionales. Su código no se realiza mediante secuencias de texto, sino en forma gráfica, similar a un diagrama de flujo.

Clark, Cockrum, Ibrahim y Smith (1994), señalan que LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica, que se ejecuta a velocidades comparables con programas compilados en C; igualmente mencionan que un IV es un módulo de software, realizado gráficamente para que parezca un instrumento físico; tiene un panel frontal que sirve como interface interactiva para entradas y salidas, un diagrama de bloque que determina la funcionalidad del IV.

Un instrumento tradicional, señala House (1995), se caracteriza por realizar una o varias funciones específicas que no pueden ser modificadas. Un IV es una combinación de elementos de hardware y software usados en una PC, que cumple

las mismas funciones que un instrumento tradicional. A diferencia de un instrumento convencional, un IV es altamente flexible y puede ser diseñado por el usuario de acuerdo con sus necesidades y sus funciones pueden ser cambiadas a voluntad modificando el programa. (Instruments, 2008) En la tabla 3.2 se muestran características comparativas entre un instrumento tradicional y uno virtual.

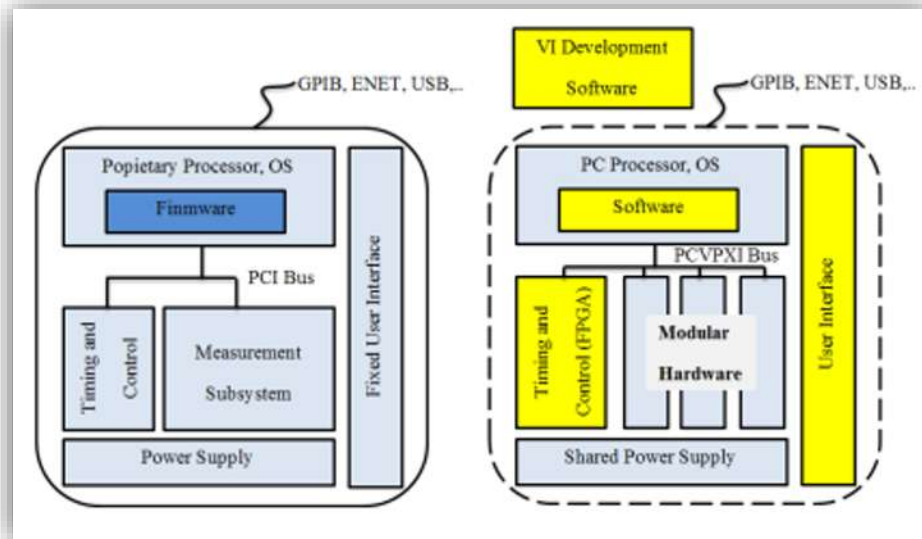


Figura 3.2. Instrumentos tradicionales (izquierda) e instrumentos virtuales basados en software (derecha) comparten a gran escala la misma arquitectura en componentes, pero con filosofías radicalmente diferentes.

Fuente: National Instruments.

Tabla 3.2. Comparativa instrumento tradicional vs instrumento virtual.

Instrumento Tradicional	Instrumento Virtual
Definido por el fabricante	Definido por el usuario.
Funcionalidad específica, con conectividad limitada.	Funcionalidad ilimitada, orientado a aplicaciones, conectividad amplia.
El hardware es la clave.	El software es la clave.
Alto costo/función.	Bajo costo/función, variedad de funciones, reusable.
Arquitectura cerrada.	Arquitectura abierta.
Lenta incorporación de nueva tecnología.	Rápida incorporación de nuevas tecnologías, gracias a la plataforma PC.
Alto costo de mantenimiento.	Bajo costo de mantenimiento.

La flexibilidad, el bajo costo de mantenimiento, la reutilización, la personalización de cada instrumento, la rápida incorporación de nuevas tecnologías, el bajo costo por función, etc. Son algunos de los beneficios que ofrece la instrumentación virtual. La instrumentación virtual puede también ser implementada en equipos móviles laptops equipos distribuidos en campo, equipos a distancia (conectados vía radio, Internet, etc.), o equipos industriales, etc.

3.3. Instrumento virtual para medir el IRI

El IV queda definido como el conjunto de software y hardware que agregado a una PC permite a los usuarios interactuar con la computadora como si se estuviera utilizando un instrumento electrónico hecho a medida.

El software es la esencia del sistema de instrumentación virtual, como el hardware lo es para un instrumento tradicional, ya que es el que le confiere la flexibilidad necesaria para variadas aplicaciones y modos de operación. El IV se completa con una tarjeta apropiada para la captura, conversión y acondicionamiento de las señales eléctricas representativas de las variables físicas a estudiar.

3.3.1. Elementos del instrumento para medición del IRI

Adquisición de datos.- La adquisición de datos es el proceso mediante el cual se miden los parámetros de las variables como el voltaje, temperatura, presión, etc. Para realizar la adquisición se requiere de un sensor o transductor, el cual proporciona señales eléctricas proporcionales a la magnitud física de la variable a medir. Los sensores o transductores pueden ser conectados a una computadora utilizando tarjetas electrónicas para adquirir las señales, o bien, puede provenir de sitios remotos si la adquisición se realiza mediante dispositivos de conexión inalámbrica tales como Bluetooth, Wifi entre otros, también se pueden obtener

señales provenientes de puertos o buses de comunicación asociados a las computadora como son el puerto serial, el puerto USB, etc.

El método básico para realizar la manipulación de los datos incluye el uso de tarjetas de adquisición, las cuales son dispositivos que se encargan de adquirir señales físicas provenientes de los sensores y de generar señales físicas provenientes de datos procesados por la computadora. Las tarjetas de adquisición son la base de la instrumentación virtual, ya que mediante su uso se realiza la comunicación de parámetros físicos del mundo real con la computadora lo cual permite interactuar físicamente con señales tanto virtuales como reales.

En el presente proyecto se utilizó una tarjeta tipo USB de *National Instruments* analógica-digital, modelo 6009 (Figura 3.3), con las siguientes características:



Figura 3.3. Tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 /S digitales; controlador de 32 bits.
- Energizada por bus para mayor movilidad, conectividad de señales integrada.
- Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI, ANSI C/C++, Measurement Studio, SignalExpress, Visual Basic .NET y Visual C#.

Dos sensores de desplazamiento lineal Honeywell analógicos de 225 mm de desplazamiento, modelo SPS-L075-HALS (Figura 3.4), con las siguientes características:



Figura 3.4. Sensor analógico de desplazamiento lineal.

- Resolución de 0.14 mm (0.0055 in).
- Voltaje de suministro de 6 Vdc a 24 Vdc.
- Salida de 0 Vdc a 5 Vdc.
- Voltaje de corriente de 34 mA máxima.
- Linealidad $\pm 0.4\%$ escala completa de salida.

Un acelerómetro. Dispositivo electromecánico que detecta las fuerzas de aceleración, ya sea estática o dinámica, las fuerzas estáticas incluyen la gravedad, mientras que las fuerzas dinámicas pueden incluir vibraciones y movimiento. Los acelerómetros pueden medir la aceleración en uno, dos o tres ejes, siendo los de tres los más comunes.

De acuerdo a la interfaz de comunicaciones los acelerómetros se comunican a través de un convertidor analógico, digital, o interfaz de conexión modulada. Los de interfaz analógica entregan un voltaje proporcional a la aceleración en cada uno de sus ejes (hablando del de tres ejes) que normalmente oscilan entre tierra y el valor de alimentación. Los acelerómetros son generalmente dispositivos de baja potencia, la corriente requerida cae típicamente en la gama de micro (μ) o miliamperios, con una tensión de alimentación de 5 volts o menos.

En el presente proyecto se utiliza un acelerómetro MMA7361 de Freescale (Figura 3.5), dispositivo con salida analógica de 3 ejes. Dicho acelerómetro puede ser configurado para realizar mediciones entre ± 1.5 g y ± 6 g, incluye características

que simplifican en gran medida la interfaz con circuitos analógicos y digitales, como filtro pasa bajo, compensación de temperatura y detección de caída libre.



Figura 3.5. Acelerómetro de tres ejes.

Características del acelerómetro MMA7361:

- Acelerómetro con interfaz analógica, requiere 3 canales de ADC en el microcontrolador.
- Rango de medida seleccionable 1-5 y 6g.
- Módulo con regulador de voltaje incluido, puede usarse en sistemas que lo alimentan con 3.3 y 5 volts.
- Capacidad de detección de caída libre (salida digital).
- Filtro pasa bajo en salidas analógicas, compensación de temperatura.
- Alimentación del MMA7361: 2.2 a 3.6V 400 uA.

Un sensor de efecto Hall lineal (Figura 3.6), o simplemente sensor Hall (descubierto en 1879 por Edwin F. Hall). Este tipo de sensor es un dispositivo semiconductor que genera un voltaje de salida cuando está expuesto a un campo magnético. Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente.



Figura 3.6. Sensor de efecto Hall lineal.

El campo magnético que se utiliza para el funcionamiento de este sensor es un imán de neodimio (Figura 3.7) con las siguientes características:



Figura 3.7. Imán de neodimio.

- Grado N50.
- Material NdFeB.
- Potencia de 5,900 Gauss.
- Revestimiento de Ni-Cu-Ni (Nickel).
- Soporta temperaturas de hasta 80°C (176°F).
- Fuerza de atracción de aproximadamente 2kg.
- Peso aproximado de 4 gr.
- Espesor de 2 mm.
- Ancho de 15mm.
- Largo 30 mm
- Dirección de magnetización: Lateral en caras planas.

Los elementos descritos anteriormente van montados sobre un vehículo ligero de un solo eje como el que se muestra en la figura 3.8, estos elementos van colocados en puntos estratégicos para el correcto funcionamiento del mismo, la posición exacta de cada uno de ellos se describe en el capítulo IV de esta tesis.

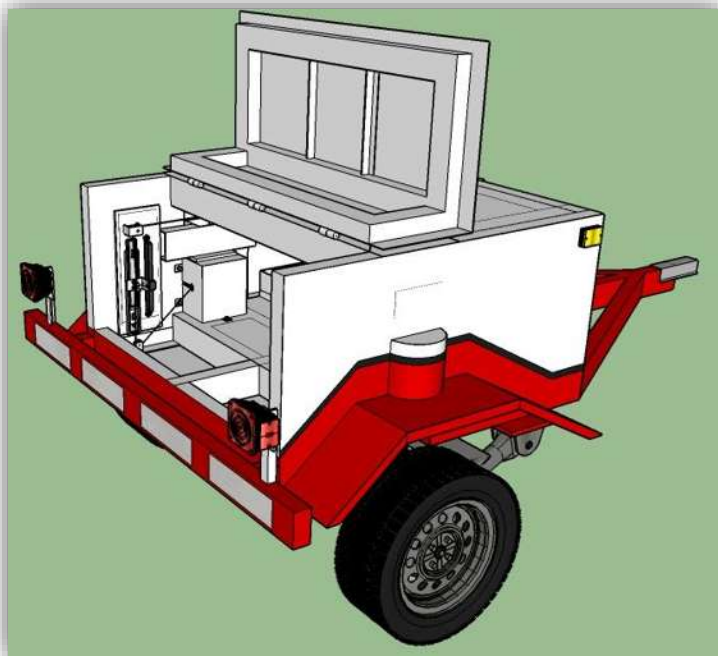


Figura 3.8. Vehículo ligero tipo remolque de un solo eje.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

En la figura 3.9 se muestra una fotografía del equipo en una de las pruebas piloto para monitoreo del funcionamiento.



Figura 3.9. Equipo medidor de IRI.

Procesamiento de la información.- El procesamiento de la información consiste en la manipulación de los datos obtenidos después de medir la variable física. Para tal procesamiento se utilizó una PC con las siguientes características; marca HP, modelo ProBook 4720s, con un procesador Intel(R) Core(TM) i3 CPU M 330 @ 2.13GHz 2.13GHz, memoria RAM de 2 GB, con un sistema de 64bits y un disco duro de 300GB.

Capítulo IV

Diseño del hardware y software

El hardware se refiere a todas las partes físicas de un instrumento. Como pueden ser componentes eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos así como cables, gabinetes o cajas y cualquier otro elemento tangible involucrado. En este capítulo se presenta el desarrollo del hardware necesario para el equipo de medición del IRI tipo respuesta, equipo basado en el modelo del cuarto de carro, de tipo respuesta a base de instrumentación virtual.

4.1. Equipo tipo respuesta

Los modelos matemáticos de vehículos tipo respuesta han sido usados desde la época de los años 40's por los ingenieros encargados del diseño y evaluación de aviones y vehículos militares.

Los equipos tipo respuesta (RTRRMS) son aquellos que operan a velocidad normal de circulación de una carretera, dispositivos montados sobre un vehículo liviano o en un remolque especial. Estos equipos miden los movimientos verticales acumulados de la carrocería del automóvil o remolque con respecto al eje del vehículo instrumentado para el procesamiento y análisis de la información (Figura 4.1). De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la rugosidad del camino. (Karamihas, 1998)

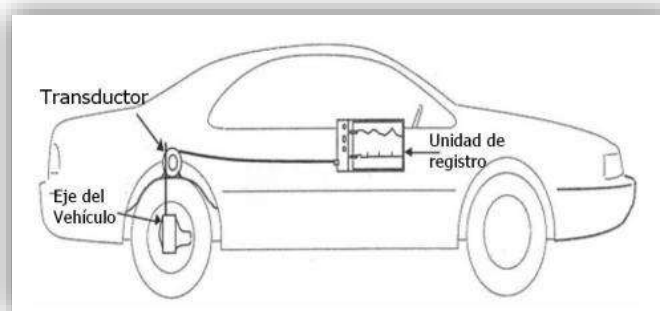


Figura 4.1 Componentes de equipo tipo respuesta.

Fuente: The little book of Profiling.

4.2. Desarrollo del equipo medidor de IRI

Se buscó diseñar un equipo que resultase funcional, económico y de fácil operación. Como resultado de la investigación para el diseño y construcción del equipo se llegó a la selección de un vehículo ligero tipo remolque de un solo eje (Figura 4.2) de dimensiones apropiadas para su funcionamiento, es decir, que su respuesta al ser remolcado no tuviese efectos negativos por ser muy ligero o muy pesado.

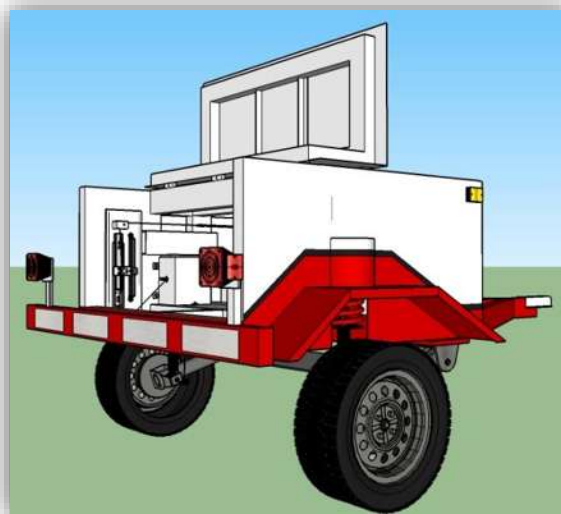


Figura 4.2 Vehículo ligero tipo remolque.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

El diseño parte de la selección de un eje con suspensión McPherson (4.3). Este tipo de suspensión combina un amortiguador con un resorte en una misma unidad (Figura 4.4), lo que otorga una suspensión más compacta y ligera y que se adecua al modo de trabajar de los RTRRMS. El eje seleccionado fue uno de Jetta generación cuatro, que cumple con la característica de suspensión de los equipos que se han desarrollado.

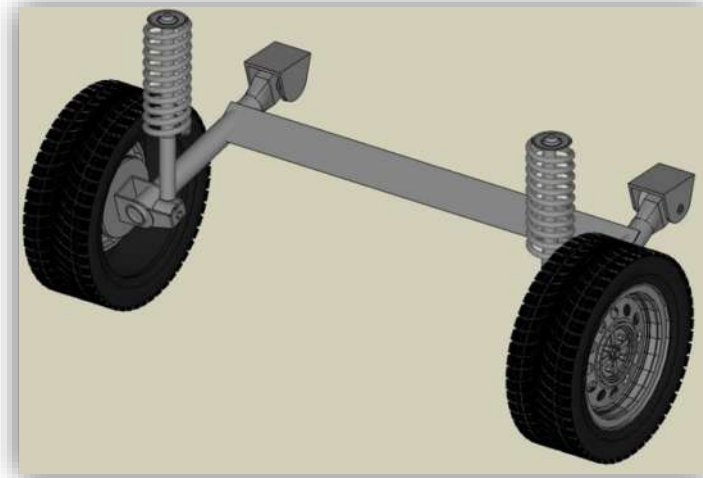


Figura 4.3. Eje con suspensión McPherson.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

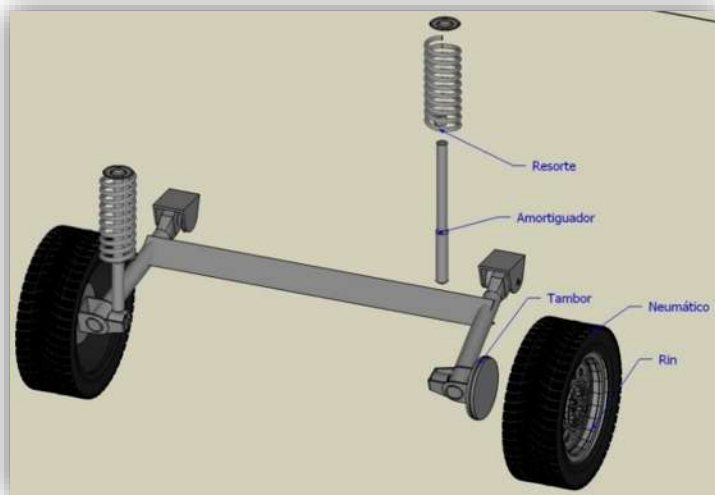


Figura 4.4. Desglose de eje.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

Las dimensiones de la carrocería se diseñaron de acuerdo a las longitudes del eje seleccionado. La elección del tipo de material para la carrocería se consideró con el objeto de obtener un peso aproximado de trescientos cincuenta kilogramos, peso para que el vehículo al ser remolcado tuviera un comportamiento estable. Las dimensiones de carrocería se muestran en las figuras 4.5 y 4.6.

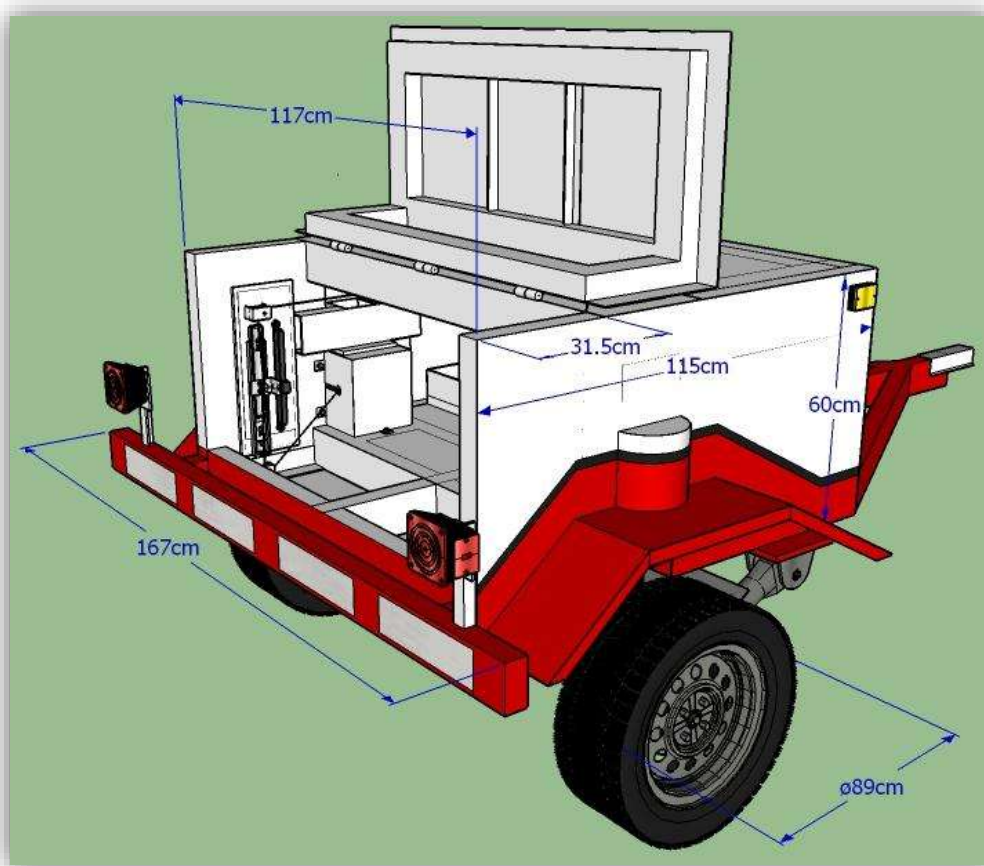


Figura 4.5. Dimensiones de carrocería (1).

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

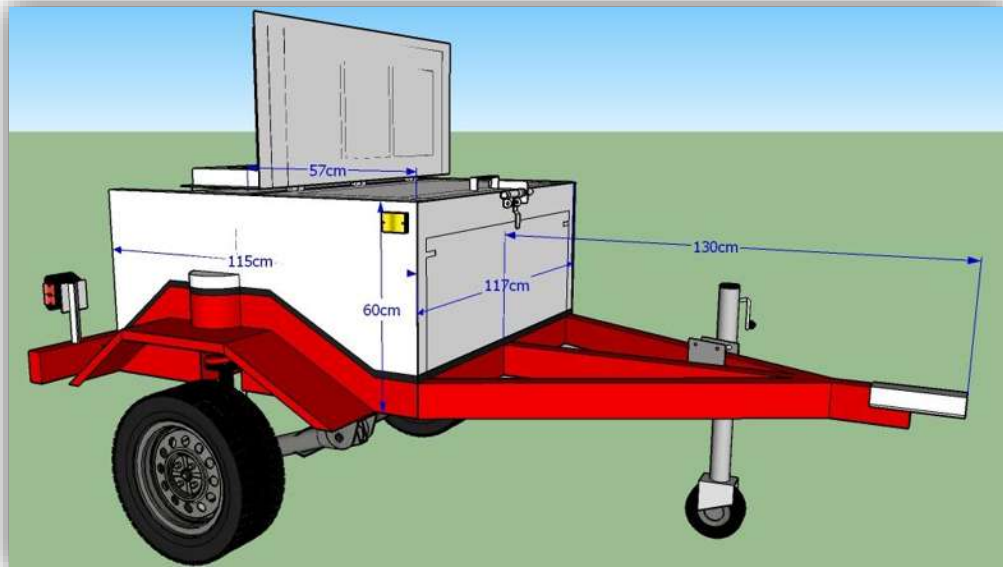


Figura 4.6. Dimensiones de carrocería (2).

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

El IRI es el valor numérico que resume la calidad de la rugosidad de una carretera. Ésta impacta la respuesta del vehículo, provocándole movimientos indeseables que afectan su dinámica. Entonces, para la medición del IRI se requieren sensores para medir el desplazamiento vertical acumulado de los amortiguadores, es decir, el movimiento del eje con respecto a la carrocería, lo que representa la respuesta que tiene el vehículo ante las irregularidades del camino.

En el presente equipo se utilizan dos sensores de desplazamiento lineal, un sensor de efecto hall para la obtención de la velocidad y un acelerómetro encargado de medir las vibraciones a las que está expuesto el vehículo

Los sensores fueron colocados en puntos estratégicos para obtener los mejores resultados. Los dos de desplazamiento lineal se colocaron dentro de la caja del vehículo, en las paredes de éste (Figura 4.7) conectados al eje. Se usan dos bien para obtener un valor de desplazamiento promedio o por rodada, el acelerómetro se ubica en la parte central de la base de la carrocería (Figura 4.8) y el sensor de efecto Hall se coloca dentro del tambor del eje así mismo el imán de neodimio (se utilizaron cuatro, colocados de manera equidistante) que se requiere para su funcionamiento (Figura 4.9).

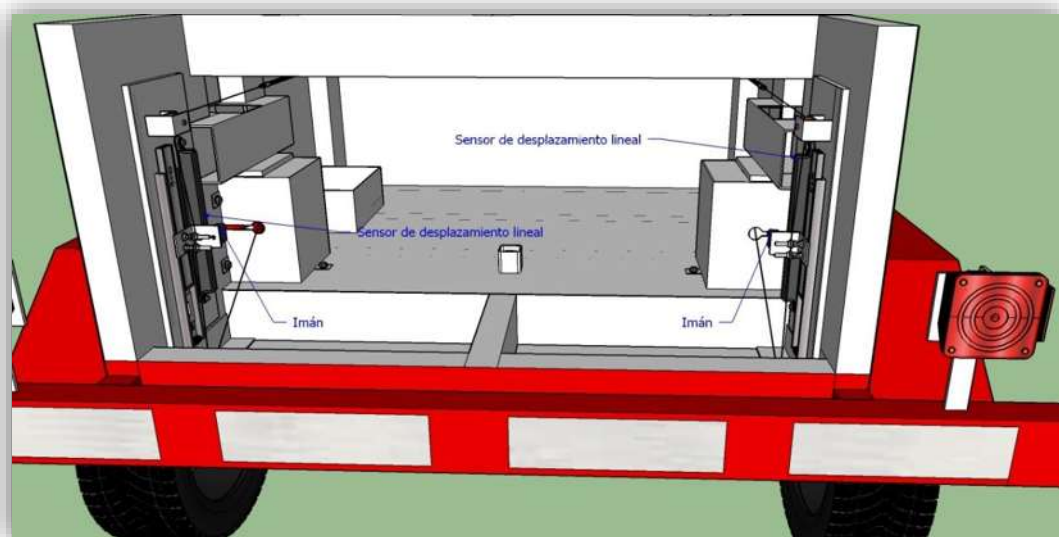


Figura 4.7. Posición de sensores de desplazamiento lineal.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

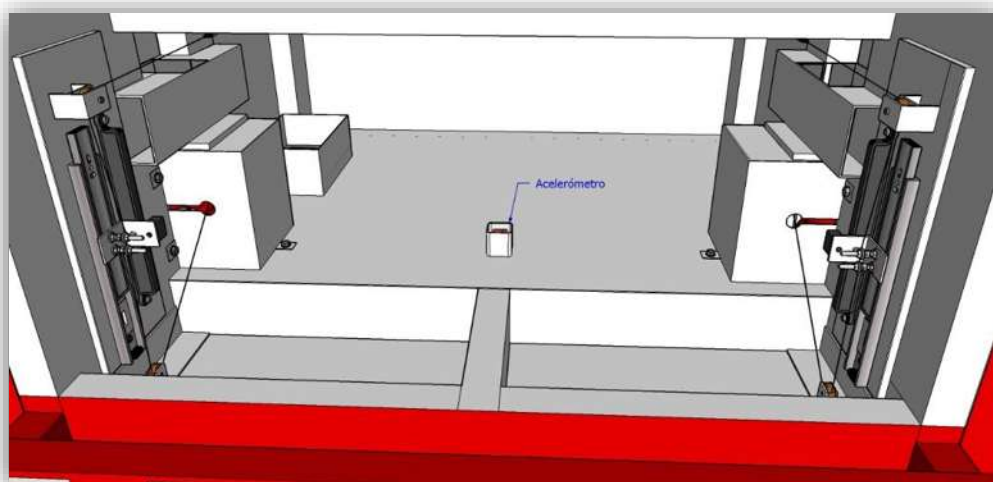


Figura 4.8. Posición del acelerómetro.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

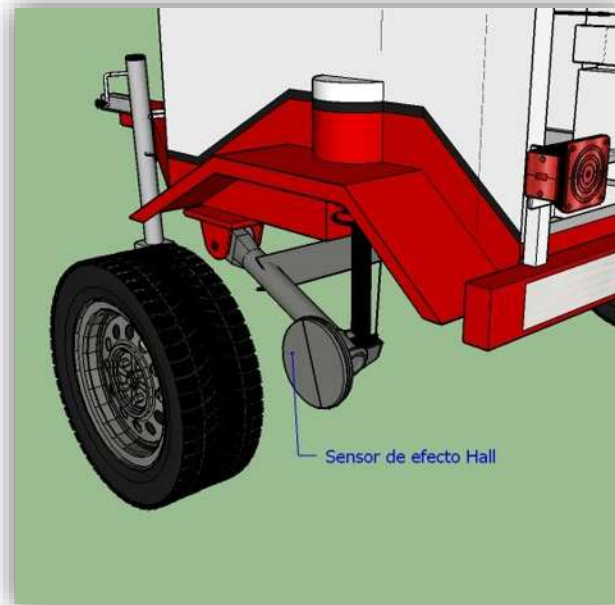


Figura 4.9. Posición del sensor de efecto hall.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

La finalidad de los imanes de neodimio como se dijo en el párrafo anterior es para que el sensor de efecto Hall funcione, el conjunto hace posible obtener la distancia recorrida del equipo. Cada que el sensor detecta el campo de un imán indica que el vehículo ha avanzado 0.445 m puesto que la circunferencia del neumático es de 1.78m.

Los sensores de desplazamiento lineal se montaron cada uno sobre una placa metálica que va atornillada a la pared lateral de la carrocería del remolque. Los imanes con los que trabajan éstos sensores se atornillaron a una corredera de aluminio de 12 pulgadas (apoyados sobre un ángulo) de manera que quedan exactamente alineados al sensor para que detecte el campo como se muestra en la figura 4.10.

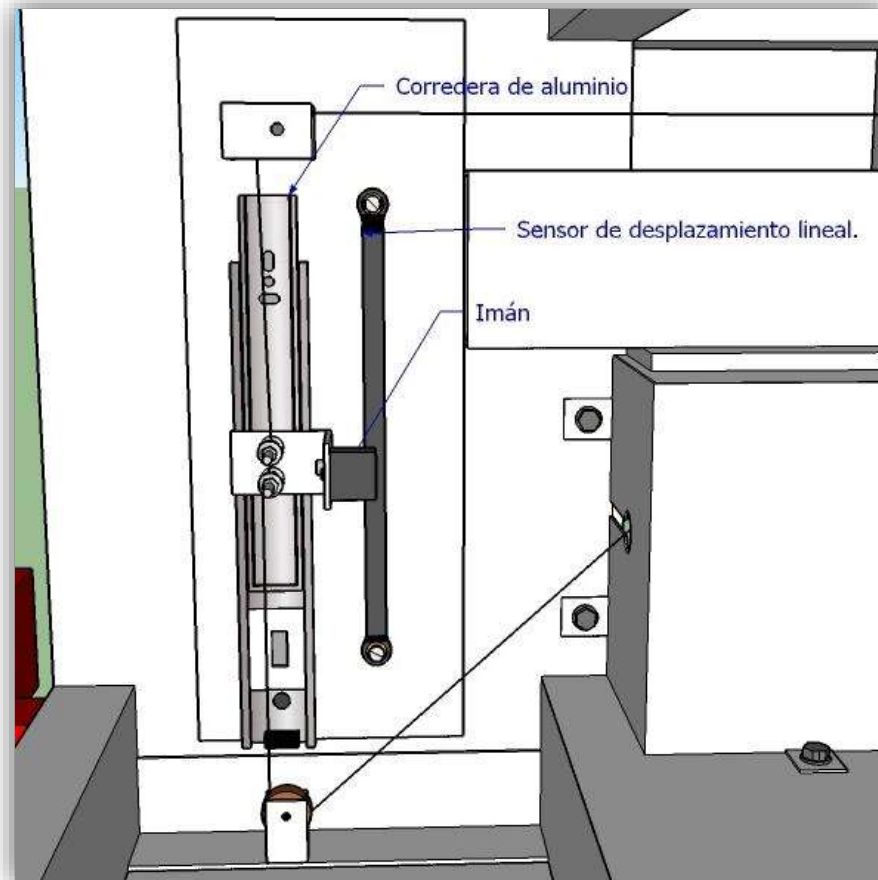


Figura 4.10. Colocación de sensor de desplazamiento lineal.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

Para el sistema de funcionamiento de los sensores de desplazamiento lineal se utiliza cable (de freno de bicicleta), carruchas y una liga. En la figura 4.11 se muestra esquemáticamente este sistema de funcionamiento. Primero al aje se le colocó un pedazo de ángulo de 5cm para sujetar el cable que pasa por una primera y una segunda carrucha para proceder a sujetar el imán sobre la corredera y posteriormente este mismo cable pasa por una tercera y última carrucha, finalmente se sujeta el cable a una liga, la cual va sujeta a la pared frontal de la carrocería del remolque. Las carruchas son para representar linealmente el desplazamiento del eje con respecto a la carrocería.

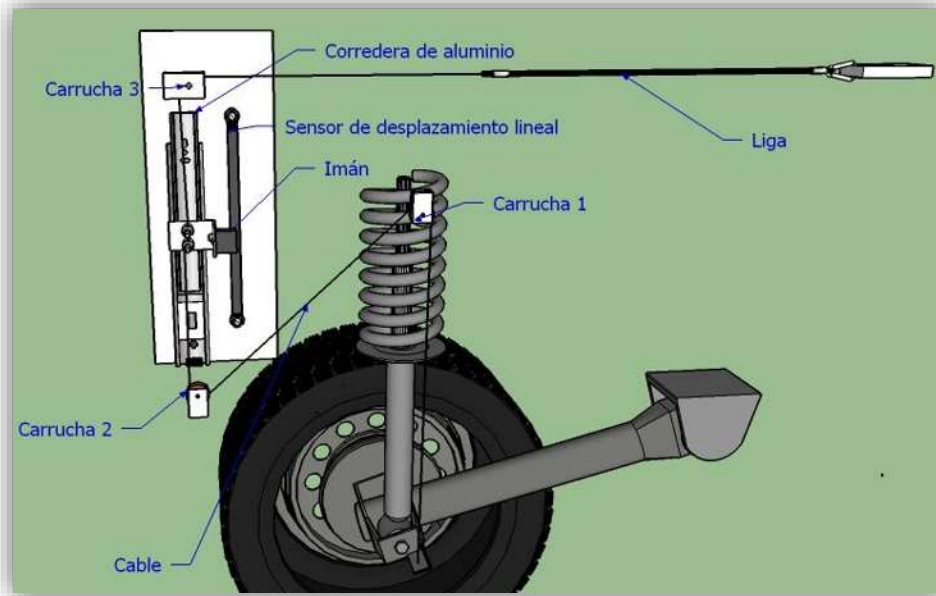


Figura 4.11. Sistema de funcionamiento de sensor de desplazamiento lineal.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

Con la finalidad de tener los sensores y tarjeta libres de polvo o de agua, en la parte que quedaba abierta (zona amortiguador y resorte) se optó por diseñar una tapa que se pudiera quitar y colocar con facilidad. Entonces se construyó una tapa la cual se fija con pija-brocas (Figura4.12). Y así el sistema de amortiguador y resorte queda totalmente aislado con la parte interna de la carrocería del vehículo, evitando la introducción de materiales indeseables. Además esta consideración es funcional para cuando se requiere cambiar el cable del sistema de los sensores de desplazamiento.

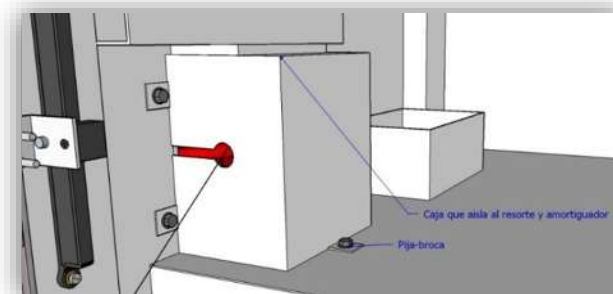


Figura 4.12. Caja para cubrir resorte-y amortiguador.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

Como se mencionó en el subtema 3.3.1. para la adquisición se utiliza una tarjeta de adquisición de datos, la cual va dentro de una caja de lámina de dimensiones diseñadas especialmente para que ésta entrara junto con su sistema de cableado y conexiones. El objetivo de ésta caja es proteger la tarjeta del polvo y las vibraciones a las que estaría expuesta si se colocará directamente sobre la base.

La caja de la tarjeta de adquisición de datos va dentro del remolque (Figura 4.13) y de aquí sale un cable (extensión de USB) el cual se dirige a la cabina donde va la PC para la lectura de datos.

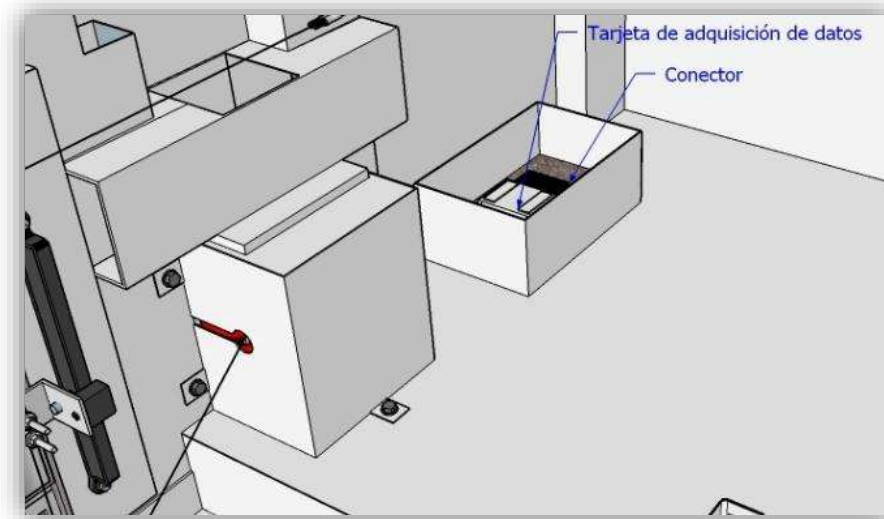


Figura 4.13. Posición de tarjeta de adquisición de datos.

Elaboró: P.I. J. Francisco Ramos Herrera.

A la tarjeta de adquisición de datos se conecta cada uno de los sensores utilizados para que ésta interprete el voltaje producido por los mismos y en conjunto con el software manipular la información para obtener el resultado de las variables medidas.

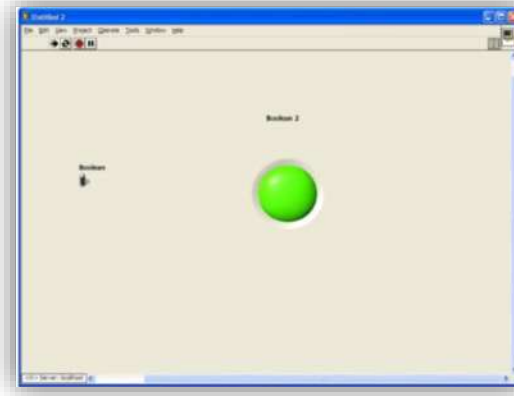
4.3. Software para obtención del IRI

Para el funcionamiento del propósito de construcción del equipo para medición del IRI se requiere un software que realice la obtención, adecuación y procesamiento de la información que arroja cada uno de los sensores empleados. Sin el software el equipo simplemente no cumpliría con sus propósitos de diseño.

Para la configuración del IV se utilizó el programa LabVIEW, uno de los más difundidos para aplicaciones de instrumentación virtual, y que está basado en el lenguaje gráfico de programación G para facilitar la interacción sistema-usuario y orientado particularmente a la adquisición de datos. La particularidad del lenguaje G consiste en la posibilidad de programar gráficamente a partir de la asociación de objetos denominados módulos de un IV, reduciendo considerablemente los tiempos de desarrollo para lograr la adquisición, control, análisis y presentación de datos.

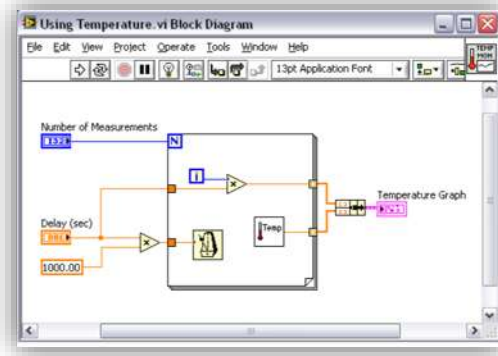
En la configuración de un IV con LabVIEW se distinguen tres partes:

a) Panel frontal o interfaz interactiva de usuario, que simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede tener perillas, botones de comando, y otros controles que son las entradas del usuario. También se pueden simular indicadores que constituyen la salida del programa. Los datos se pueden ingresar por mouse o teclado, visualizándose en pantalla los resultados del programa o proceso. En la figura 4.14 se muestra un ejemplo de controles que suelen usarse.



4.14. Ejemplo de panel frontal de LabVIEW.

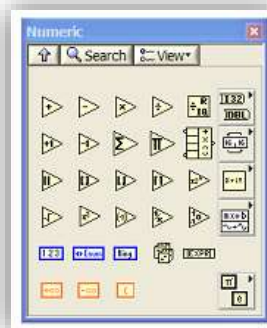
b) Código gráfico o diagrama de bloques. Es el código fuente del instrumento virtual, y se construye utilizando el lenguaje de programación gráfica. Es este lenguaje de programación es el que permite que una representación adecuada de los bloques del instrumento sea en realidad el programa que va a ejecutarse. En la figura 4.15 se muestra un ejemplo de los códigos de un diagrama de bloques.



4.15. Ejemplo de diagrama de bloques de LabVIEW.

c) Íconos y conectores. Son los componentes del código gráfico. Los íconos representan módulos de un IV, funciones o estructuras de control del programa. Los conectores indican el flujo de entrada y salida de los datos en el diagrama de bloques. La naturaleza jerárquica y modular de los íconos posibilita su utilización como sub-módulos, permitiendo la elaboración de sub-rutinas y la programación modular.

Contiene el código fuente gráfico. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloque.



4.16 Ejemplos de iconos de LabVIEW.

4.3.1. Descripción del software para la medición del IRI

La finalidad de construir éste equipo tipo respuesta es para la medición del IRI. Las dos variables que intervienen para la obtención de éste parámetro son desplazamiento vertical acumulado (de la masa del vehículo con respecto al eje) y velocidad, puesto que el IRI está en función de estas dos variables. La unidad de medición está dada en m/km o mm/m.

En el desarrollo y utilización del software tiene como finalidad procesar la información recolectada por cada uno de los sensores por medio de una tarjeta de adquisición de datos (ver apartado 3.3.1). La computadora transmite un voltaje (señal de salida) a la tarjeta de adquisición de datos y esta a su vez transmite ese voltaje a los sensores, en ese momento los sensores se activan y regresan una señal (señal de entrada) a la tarjeta y esta a su vez regresa una señal a la computadora. La señal de entrada es procesada en la computadora mediante el software. En éste proceso se realiza la conversión del voltaje en una escala determinada de la variable física a medir.

Como se ha descrito en el apartado 3.3.1 se utilizan tres diferentes tipos de sensores, de desplazamiento lineal, de efecto Hall y un acelerómetro, para el procesamiento de la información estos sensores envían una señal de entrada al software, teniendo como medio el resto de la instrumentación (ver apartado 3.1). Una vez que se obtiene el valor de esta señal se calibra el sensor de acuerdo al tipo de variable a medir convirtiendo el voltaje en la unidad de medición de esta variable, ejemplo en el sensor de desplazamiento lineal se convierte el voltaje a cm.

Con el sensor de efecto Hall se realiza la adquisición de la variable velocidad. Que consiste en la obtención del desplazamiento y el tiempo en que se recorre éste con el remolque. El desplazamiento se obtiene con las variaciones de voltaje que transmite éste sensor al ser afectado por un campo magnético, conociendo que esta variación ocurre en un desplazamiento determinado (ver apartado 4.2). El software es programable para que recolecte información de cierta distancia en particular y a que intervalo hacerlo.

Los sensores de desplazamiento lineal representan el movimiento vertical acumulado que tiene el eje con respecto a la carrocería del vehículo. El software está programado para recolectar el desplazamiento vertical acumulado que se presenta en el recorrido de una vialidad. El valor obtenido de los desplazamientos verticales acumulados también se programa para una distancia preestablecida.

El sensor se colocó con fines de investigación posterior, actualmente se encuentra en proceso de estudio para la obtención de resultados con el mismo para futuras mediciones.

En resumen el software se encarga de adquirir y procesar las variables a medir por el equipo, como se estableció anteriormente el IRI está en función del desplazamiento y velocidad.(Herrera, 2016)

Capítulo V

Descripción del proceso de calibración

La calibración es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia (o estándar). Según la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, la calibración es "una operación que, bajo condiciones específicas, establece en una primera etapa una relación entre los valores y las incertidumbres de medida provistas por estándares e indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medida asociadas y, en un segundo paso, usa esta información para establecer una relación para obtener un resultado de la medida a partir de una indicación" (Metrology, 2008).

De acuerdo a la definición anterior se deduce que para la calibración de un instrumento es necesario contar con otro instrumento de mayor precisión, es decir, de un patrón, que proporcione el valor para compararlo con el valor del instrumento en calibración. Es importante mencionar que se deben realizar una cadena ininterrumpida de comparaciones hasta llegar al patrón primario. El objetivo de calibrar un instrumentos es el de verificar el buen funcionamiento del mismo, que trabaje de acuerdo a las normas de calidad y garantizar que se tratan de medidas confiables.

El proceso de calibración del equipo medidor de IRI consiste en utilizar nivel y estatal o algún método perfilométrico. Se requiere de tramos de prueba establecidos con valores de IRI conocidos. El equipo por calibrar pasa a distintas velocidades (30, 50 y 60 km/h) por éstos de tres a cinco veces.

5.1. Requisitos para la calibración

Para el proceso de calibración se requieren de tramos carreteros con condiciones de calidad variada, es decir, en buenas, regulares y malas condiciones (de acuerdo al valor del IRI), éstos deben ser rectos y sin interrupciones (topes, vías de ferrocarril, puentes, etc.) que puedan elevar o disminuir el valor del IRI.

Los tramos deben ser mínimo de 300 m, contando además con una distancia de aproximación de 50 m como mínimo, puesto que los equipos deberán llevar la velocidad estipulada antes de llegar al inicio del tramo. Se recomiendan dos tramos para cada nivel de rugosidad, es decir, como mínimo se necesita de seis.

Los tramos deben tener condiciones homogéneas en toda su longitud.

Cuando la medición del IRI se realiza con nivel y estadal los tramos se recomienda ser marcados con pintura indeleble y visible en dos roderas (por donde pasan las llantas del vehículo) a cada 0.25 m y haciendo una marca notoria a los 1 y 10 m, esto para facilitar la tarea del levantamiento, puesto que se vuelve tedioso realizar el levantamiento de 2,400 puntos y previniendo si se requiere la corroboración de alguno de los valores.

Los tramos de calibración se recomienda sean de dos carriles por sentido para no parar la circulación del tránsito.

Los valores de IRI de los tramos deben estar actualizados.

Nota: Para mejorar la exactitud de la calibración es factible incrementar el número de tramos para cada nivel de rugosidad.

Las mediciones del IRI en superficies de calibración pavimentadas necesitarán ser repetidas periódicamente, particularmente si el proyecto cubre un largo periodo de tiempo. (Montenegro, 1999)

5.1.1. Procedimiento de calibración para el equipo medidor de IRI

Se solicitó apoyo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) Unidad Regional Morelia, Michoacán, puesto que cuenta con un equipo May's Ride Meter y hacen calibraciones frecuentemente. En una reunión con el jefe del departamento facilitaron los resultados de la última evaluación hecha a los tramos de prueba. Puesto que la información es de 2010 se decidió realizar una visita a los tramos para observar las condiciones que estos guardaban.

Los tramos de calibración con los que contaba SCT son los que se enlistan a continuación:

- 1.- Morelia-Pátzcuaro (Camino viejo) km 12+900 a km 13+200 S-1.
- 2.- Cointzio-T. Morelos km 3+500 a km 3+800 S-2.
- 3.- Morelia-Pátzcuaro km 37+500 a km 37+800 S-1.
- 4.- Morelia-Pátzcuaro km 37+600 a km 37+900 S-2.
- 5.- Morelia-Pátzcuaro km 35+560 a km 35+860 S-2.
- 6.- Morelia-Quiroga Acceso a Teremendo km 7+300 a km 7+600 S-2.
- 7.- Morelia-Quiroga Acceso Entronque Cointzio km 0+830 a km 1+130 S-1.



Figura 5.1. Inicio de tramo de calibración Morelia-Quiroga Acceso a Teremendo km 7+300 a km 7+600 S-2.

De la visita se observó que los únicos tramos que guardaban las condiciones del último levantamiento fueron el tramo dos y seis (de regulares condiciones) debido al bajo nivel de tránsito que tienen. Los otros habían sido reencarpetados y por ello ya no están en condiciones de utilizarse ya que sus condiciones cambiaron totalmente.

En los tramos dos y seis que conservaron sus condiciones se realizó el levantamiento topográfico con nivel y estatal.

Debido a que se recomiendan como mínimo dos tramos por nivel de rugosidad se procedió a buscar los tramos de buenas y malas condiciones, esto con el apoyo de la Unidad Regional de Servicios Técnicos de la SCT. Facilitaron los datos de IRI del Estado de Michoacán del 2014 obtenidos con equipos de alto desempeño. Se seleccionaron los tramos más cercanos a la ciudad de Morelia con la variación de la rugosidad requerida y el mejor sitio desde el punto de vista de longitud, geometría y probabilidad de que este no cambie su superficie por un largo tiempo. Estos tramos se enlistan a continuación:

- 1 Morelia - Jiquilpan km 7+450 a 7+750 S-1 (Aprox).
2. Morelia - Salamanca km 7+400 a 7+700 S-1 (Aprox)
3. Atlacomulco - Morelia km 166+700 a 167+000 S-1 (Aprox)
4. Morelia - Jiquilpan km 9+200 a 9+500 S-1 (Aprox)

El tramo 3, era de malas condiciones, pero actualmente se repavimento, entonces este se descarta y se buscará otro tramo de malas condiciones.

Una vez establecidos los tramos de calibración se procede a pasar el May's para observar que tanto han cambiado las condiciones del pavimento a la fecha (diciembre de 2015), obteniendo como resultado una variación mínima justificable por el año que pasó.

Entonces el procedimiento a seguir para la calibración del equipo medidor de IRI es el siguiente (de acuerdo a los requisitos de calibración):

- Marcar los tramos de 300 m.
- Realizar el levantamiento topográfico con nivel y estatal en ambas roderas a cada 25 cm.
- Capturar los datos en una hoja de excel, haciendo la conversión a mm, de ambas roderas (sacando un promedio de los valores de cada una).

- Posteriormente se obtiene el IRI topográfico con el pseudocódigo descrito en el reporte n. 45 del Banco Mundial. Se realizan simulaciones a velocidades de 30, 50 y 80 km/h.
- Pasar el equipo de tres a cinco veces por cada tramo a 30, 50 y 80 km/h (manteniendo la velocidad constante), obteniendo una velocidad promedio y con los desplazamientos verticales acumulados se procesa la información junto con el IRI topográfico anteriormente obtenido, teniendo como resultado la calibración del equipo.

Conclusiones

El parámetro IRI es de gran relevancia en la evaluación de pavimentos debido que de acuerdo a éste es posible diagnosticar las tareas de conservación y mantenimiento de una carretera. Parámetro sobre el cual se basan los sistemas de gestión para infraestructura carretera. Además sirve para el cálculo de los costos de operación vehicular.

Es posible diseñar y construir tecnología mexicana competitiva, una de las ventajas es que resulta mucho más económico que comprar extranjera, además de que se abren más campos laborales y de investigación.

Surgen imprevistos que hacen necesario modificar el diseño previamente realizado o incluso cambiar los elementos que constituyen el modelo. Por ejemplo en el caso particular de este proyecto durante la etapa de construcción del remolque se modificó el sistema para la instalación de los sensores de desplazamiento lineal. En la etapa de instrumentación se tuvo que modificar la posición del sensor de efecto hall y cambiar los imanes con los que se activa, puesto que se presentaban pérdidas en los valores de velocidad.

Un instrumento virtual representa grandes ventajas en cuanto a costo y operación sobre un equipo tradicional. Puesto que el instrumento virtual no se encuentra limitado en cuanto a sus funciones, es decir, estas son modificables e incluyentes. Lo que hace posible que un mismo equipo/modelo pueda realizar distintas tareas y que están se puedan cambiar conforme la introducción de nuevas tecnologías.

LabVIEW permite manejar la información de una manera sencilla, facilitando el análisis de la señal, es un software bondadoso, que realiza las indicaciones que se le establecen.

El proceso de calibración lleva un tiempo debido al levantamiento topográfico que se realiza con nivel y estatal, por la cantidad de puntos que se levantan, pero resulta muy efectivo para la tarea de calibración, es una referencia confiable.

Es posible diseñar y construir un equipo para la medición del IRI a un precio muy accesible comparado con el costo de adquisición de los equipos comerciales extranjeros que además son de tareas limitadas. El equipo desarrollado no queda limitado en cuanto a sus funciones si no al contrario tiene características para ampliar sus tareas. El equipo servirá para realizar evaluaciones de la red carretera a nivel estado y país, que sirvan para realizar propuestas de mejora a las vialidades.

Apéndices

A. Costo de construcción de equipo medidor de IRI

Como parte fundamental del objetivo de la presente tesis fue que el equipo que se diseñó y construyó fuese de bajo costo. En la tabla A.1 se muestra la inversión total de construcción e instrumentación sin desglose de los conceptos

Tabla A.1. Costo de construcción e instrumentación de equipo para medición del IRI.

Concepto	Monto
Eje.	\$1,856.0
Material para construcción de carrocería.	\$7,641.66
Mano de obra de construcción.	\$6,150.0
Accesorios	\$2,779.40
*Mano de obra de detalles para instalación de instrumentación.	\$900.0
Herramienta	\$404.9
Pintura	\$1,823.96
Instrumentación	\$10,579.40
Logotipos	\$800.0
Extras	\$1,540.0
TOTAL	\$34,475.32

*Modificaciones al sistema de instrumentación

Es importante mencionar que no se tiene considerado el costo de la PC que se utiliza para el procesamiento de la información y tampoco del inversor de corriente.

B. Deterioros en los pavimentos

Se incluye el deterioro de los pavimentos puesto que estos tienen gran influencia en el valor de rugosidad. Como parte adicional del proyecto se realizó una inspección visual del estado que guardan los pavimentos en la zona sur (no se concluyó). Éste material servirá para investigaciones posteriores. Se incluye una ficha representativa al final del apéndice de lo que se realizó en campo.

De acuerdo a lo reportado de la inspección visual se tendrá una idea del valor de IRI que tendrá una vez que se realicen mediciones con el equipo diseñado y construido en la presente tesis.

El deterioro en el pavimento se refiere al estado de la superficie con relación en su apariencia general. Un pavimento en perfecto estado tiene una superficie continua sin grietas o baches; en cambio, un pavimento deteriorado presenta textura inadecuada para la circulación de los vehículos.

Los deterioros que se presentan en pavimentos flexibles y rígidos no son los mismos, aunque tienen alta relación y similitud. Los deterioros pueden ser subdivididos; por ejemplo, las grietas se describen como generales, longitudinales o transversales.

Del Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas (Instituto Mexicano del Transporte, 1991) se analizan los siguientes deterioros.

I Desprendimientos:

Baches: Oquedades de varios tamaños en la capa de rodadura por desprendimiento o desintegración inicial. Desprendimiento inicial de los agregados que al paso de los vehículos van formando oquedades (Figura B.1).



Figura B.1. Bache en pavimento flexible.

Causas Posibles:

- Falta de resistencia de la carpeta.
- Escasez de contenido de asfalto.
- Espesor deficiente.
- Drenaje deficiente.
- Desintegración localizada por tránsito.
- Puntos débiles en la superficie.

Identación: Encajamiento de objetos duros en una superficie de rodamiento, produciendo identación o desgaste localizado en la superficie.

Causas Posibles:

- Huellas de tractores o equipo pesado de construcción.
- Ponchadora de llantas de vehículos pesados.
- Accidentes de tránsito.

Levantamiento por congelación: Desplazamiento diferencial hacia arriba que produce desintegración parcial o total de capas del pavimento (Figura B.2).



Figura B.2. Levantamiento por congelación.

Causas Posibles:

- Acción de heladas.
- Ciclos de congelamiento y descongelamiento.
- Expansión localizada de capas inferiores.
- Expansión localizada de alguna porción de la sección estructural del pavimento.

Desprendimiento de agregados: Pequeñas depresiones en forma de cráter, por separación de los agregados gruesos de la carpeta asfáltica, dejando huecos en la superficie de rodamiento (Figura B.3).



Figura B.3. Desprendimiento del agregado.

Causas Posibles:

- Falta de afinidad con el asfalto.
- Escasez de asfalto.
- Expansión del agregado grueso.

Pulido de la superficie: Desgaste acelerado en la superficie de rodamiento produciendo áreas lisas (Figura B.4).



Figura B.4. Pulido de la superficie.

Causas Posibles:

- Tránsito intenso.
- Agregado grueso de la carpeta con baja resistencia al desgaste.
- Excesiva compactación.
- Mezcla demasiado rica en asfalto.
- Agregados no apropiados a la intensidad del tránsito.
- Hundimiento de agregado grueso en el cuerpo de la carpeta, o en la base cuando se trata de tratamientos superficiales.

Desintegración: Deterioro grave de la carpeta asfáltica en pequeños fragmentos con pérdida progresiva de los materiales que la componen.

Causas Posibles:

- Fin de la vida útil de la carpeta asfáltica.
- Acción de tránsito intenso y pesado.
- Tendido de la carpeta en climas fríos o húmedos.
- Agregados contaminados.
- Contenido de asfalto.
- Sobre calentamiento de la mezcla.
- Compactación insuficiente.
- Acción de heladas o hielo.
- Presencia de arcilla en cualquiera de las capas.
- Separación de agregados o asfalto ligante.

- Contaminación de solventes.
- Envejecimiento y fatiga.
- Desintegración de los agregados.
- Sección estructural deficiente o escasa.

Desprendimiento del sello: Desintegración parcial o zonificada de la superficie de rodamiento; cuando ésta se forma por uno o varios sellos, el agregado tiende a desprenderse dejando zonas expuestas por arranque de la gravilla o granzón.

Causas Posibles:

- Separación de la película de liga de los áridos por humedad.
- Dosificación inadecuada del ligante.
- Calidad dudosa del material ligante.
- Mala adherencia en capa subyacente.
- Espesores insuficientes.
- Ejecución de trabajos en malas condiciones de clima.

Erosión longitudinal de la carpeta: Desintegración parcial de la carpeta asfáltica principalmente en la frontera de la superficie de rodamiento. La carpeta materialmente se va carcomiendo, reduciendo el ancho efectivo de la carretera.

Causas Posibles:

- Labores de conservación inadecuadas.
- Falta de soporte de la carpeta en los hombros o acotamientos.
- Erosión natural del agua y viento.
- Ciclos de hielo y deshielo.
- Crecimiento significativo de hierba en acotamientos.
- Sobrecarpetas de pesos en acotamientos.
- Mala compactación de capas.

II Deformaciones:

Burbuja: Ampolla de tamaño variable localizada en la superficie de rodamiento.

Causas Posibles:

- Presiones de vapor o aire en zonas de la capa de rodamiento.

- Debilidad en espesor o consistencia.
- Liberación de cal en bases estabilizadas.

Rodera o canalización: Asentamiento o deformación permanente de la carpeta asfáltica en el sentido longitudinal debajo de las huellas o rodadas de los vehículos.

Causas Posibles:

- Baja estabilidad de la carpeta.
- Carpeta mal compactada.
- Consolidación de una o varias de las capas subyacentes.

Ondulaciones transversales (corrugaciones): Ondulación de la carpeta asfáltica en el sentido perpendicular al eje del camino que contienen en forma regular crestas y valles alternados, regularmente con separación menor a 60 cm entre ellas.

Causas Posibles:

- Unión deficiente entre capas asfálticas y/o base.
- Estabilidad de la mezcla deficiente.
- Acción de tránsito intenso.
- Base de mala calidad.
- Fuerzas tangenciales producto de aceleraciones y frenado de vehículos.
- Mala calidad de los materiales que conforman la carpeta.
- Deformaciones diferenciales de suelos de cimentación que se reflejan en capas superiores.

Protuberancias: Desplazamiento de parte del cuerpo de la carpeta asfáltica hacia la superficie, formando un montículo de considerables dimensiones.

Causas Posibles:

- Acción del tránsito intenso.
- Estabilidad inadecuada.
- Liga deficiente entre capas.
- Compactación inadecuada.
- Deformaciones plásticas de los materiales.

- Acción de las heladas.

Asentamiento transversal: Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido transversal al eje del camino.

Causas Posibles:

- Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.
- Peso propio de la sección del pavimento.
- Suelos o cimentaciones resilientes.
- Cargas excesivas o superiores a las de diseño.
- Cambios volumétricos del cuerpo del terraplén.
- Compactación inadecuada.
- Asentamientos diferenciales transversales.
- Procedimientos de construcción inadecuados.
- Drenaje o subdrenaje deficientes.
- Contaminación de capas inferiores.
- Desplome de cavidades subterráneas.

Asentamientos longitudinales: Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido longitudinal al eje del camino, en especial en los extremos laterales de la superficie de rodamiento.

Causas Posibles:

- Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.
- Peso propio de la sección del pavimento.
- Suelos o cimentaciones resilientes.
- Cargas excesivas o superiores a las de diseño.
- Cambios volumétricos del cuerpo del terraplén.
- Compactación inadecuada.
- Asentamientos diferenciales longitudinales.
- Procedimientos de construcción inadecuados.
- Drenaje o subdrenaje deficientes.
- Contaminación de capas inferiores.
- Desplome de cavidades subterráneas

- Canalización del tránsito.

Crestas longitudinales masivas: Montículos o crestas en el sentido paralelo al eje del camino, presentándose 2 y hasta 4 crestas e todo lo largo de ciertos tramos.

Causas Posibles:

- Liga inadecuada entre capas asfálticas.
- Pésima estabilidad de la mezcla asfáltica.
- Ligante de dudosa calidad.
- Flujo de la mezcla por acción de derrame de combustible (diésel).
- Tránsito intenso muy canalizado.

III Roturas:

Grietas de reflexión: Grietas longitudinales y transversales que reflejan exactamente el patrón de agrietamiento o de juntas de un pavimento existente, cuando es reencarpetado con concreto asfáltico.

Causas Posibles:

- Movimiento del pavimento subyacente.
- Liga inadecuada entre capas.
- Posibles contradicciones de capa subyacente.

Grietas finas: Pequeñas fisuras superficiales muy próximas la una con la otra, ya que no conforman un patrón regular y se extienden a cierta profundidad, pero no al espesor total de la carpeta.

Causas Posibles:

- Envejecimiento de la carpeta asfáltica.
- Oxidación del asfalto.
- Mala dosificación de asfalto.
- Exceso de finos en carpeta asfáltica.
- Compactación efectuada con mezclas muy calientes.

Agrietamiento piel de cocodrilo: Fisuras en la superficie de la carpeta asfáltica, formando un patrón regular con polígonos hasta de 20 cm. Grietas interconectadas formando pequeños polígonos que asemejan la piel de un cocodrilo.

Causas Posibles:

- Soporte inadecuado de la base.
- Debilidad de la estructura del pavimento.
- Carpetas rígidas sobre suelos de cimentación resilientes.
- Fuertes solicitaciones del tránsito.
- Fatiga.
- Envejecimiento.
- Escasez de espesor de la carpeta.
- Evolución progresiva de agrietamiento tipo mapa.

Agrietamiento tipo mapa: Forma de desintegración de la superficie de rodamiento, en la cual el agrietamiento se desarrolla en un patrón semejante a las subdivisiones políticas de un mapa, con polígonos mayores de los 20 cm.

Causas Posibles:

- Calidad deficiente de alguna de las capas de la sección estructural.
- Debilidad de la estructura del pavimento.
- Carpetas rígidas sobre suelos de cimentación resilientes.
- Fuertes solicitaciones del tránsito.
- Fatiga.
- Envejecimiento.
- Espesor escaso de la carpeta.

Grieta transversal: Agrietamiento de la carpeta que sigue un patrón transversal o perpendicular al eje del camino.

Causas Posibles:

- Acción del tránsito.
- Reflejamiento de grietas en capas subyacentes.
- Espesor insuficiente de la carpeta.
- Contracción térmica de la superficie de rodamiento.
- Deficiencia en juntas transversales de construcción.

Agrietamiento longitudinal: Fisura o grieta paralela al eje del camino o en muchos casos sobre el eje del camino.

Causas Posibles:

- Deficiencias en la junta de construcción longitudinal.
- Reflejo de grietas en capa de base.
- Asentamiento de capas por el tránsito.
- Espesor insuficiente.
- Contracción de materiales de la capa de rodamiento.
- Asentamientos aislados de capas inferiores.
- Drenaje insuficiente.

Del Catálogo de Deterioros de Pavimentos Rígidos del Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (iberoamerica, 2002) (Ana S. Figuero Infante) se analizan los siguientes deterioros.

I Juntas:

Deficiencias del sellado: Deterioro del sello de las juntas que permite la incrustación de materiales incompresibles (piedras, arenas y todo tipo de materia indeseable) y/o la infiltración de una cantidad considerable de agua superficial (Figura B.5).



Figura B.5. Deficiencias del sellado.

Se considera como deterioro del sello cualquiera de los siguientes defectos: endurecimiento, despegado de una o ambas paredes, fluencia fuera de la caja, carencia total, incrustación de materias ajenas y crecimiento de vegetación.

Causas Posibles:

- Endurecimiento: producto de mala calidad, envejecimiento.
- Despegado de las paredes de la junta: producto de mala calidad, sellado mal colocado, caja mal diseñada.
- Fluencia fuera de la caja: exceso de sello, producto de mala calidad, procedimiento de colocación deficiente.
- Carencia: producto de mala calidad, procedimiento de colocación deficiente.
- Incrustaciones de materias incompresibles: bermas no pavimentadas, vehículos que dejan caer materiales.

Juntas saltadas: Desintegración de las aristas de una junta, longitudinal o transversal o una grieta, con pérdida de trozos y que puede afectar hasta unos 500 mm dentro de la losa (Figura B.6 y B.7).

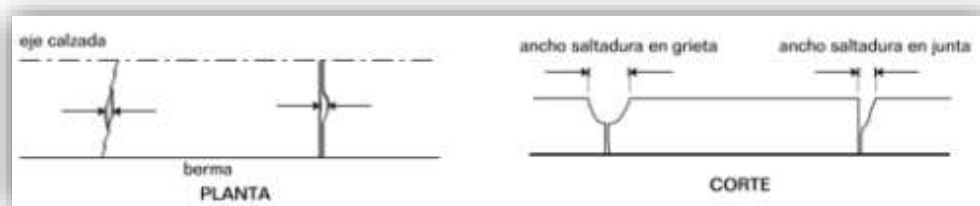


Figura B.6. Diagrama descriptivo de una junta saltada.

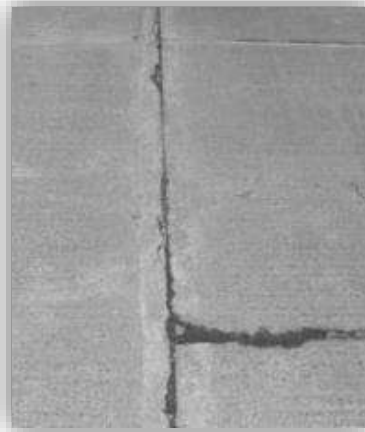


Figura B.7. Junta Saltada.

Causas Posibles:

- Debilitamiento de los bordes de la junta debido a un acabado excesivo u otro defecto de construcción.
- Penetración de partículas incompresibles dentro de la caja de una junta o dentro de una grieta activa.

Separación de la junta longitudinal: Abertura en la junta longitudinal del pavimento (Figura B.8).



Figura B.8. Separación de la junta longitudinal.

Causas Posibles:

- Ausencia de barras de acero de amarres entre pistas adyacentes.
- Desplazamiento lateral de las losas motivado por un asentamiento diferencial de la subrasante.
- Carencia de bermas.

II Grietas:

Grietas de esquina: Grieta que origina un trozo de la losa de forma triangular, al interceptar las juntas transversales y longitudinal y que forma un ángulo de aproximadamente 50 grados con la dirección del tránsito. Las longitudes de los lados del triángulo varían entre 300 mm y la mitad del ancho de la losa (Figura B.9 y B.10).

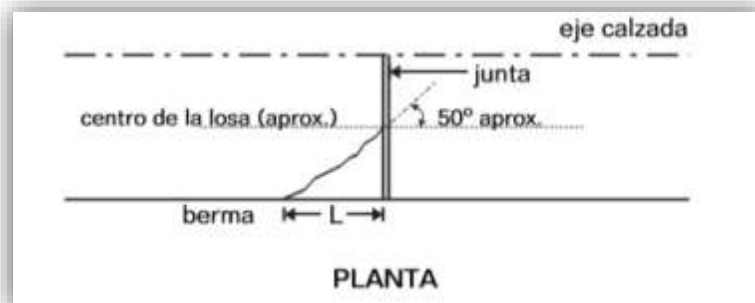


Figura B.9. Diagrama descriptivo de una grieta de esquina.



Figura B.10. Grieta de esquina.

Causas Posibles:

- Falta de apoyo de la losa, originado por erosión de la base o alabeo térmico.
- Sobrecarga en las esquinas.
- Deficiente transmisión de cargas entre las juntas.

Grietas longitudinales: Grietas que son predominantemente paralelas al eje de la calzada o que se extienden desde una junta transversal hasta el borde de la losa, pero la intersección se produce a una distancia mucho mayor que la mitad del ancho de la losa (Figura B.11 y B.12).

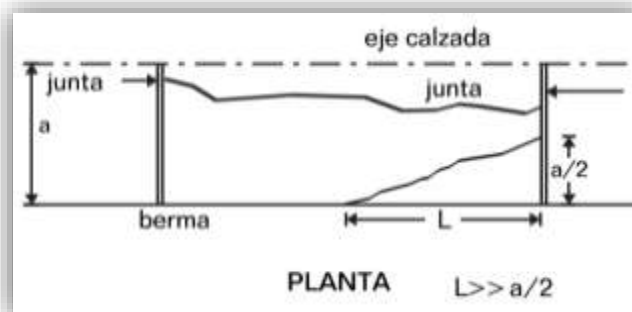


Figura B.11. Diagrama de una grieta longitudinal.



Figura B.12. Grieta longitudinal.

Causas Posibles:

- Asentamiento de la base y/o la subrasante.
- Losa de ancho excesivo.
- Carencia de una junta longitudinal.
- Mal posicionamiento de las barras de traspaso de cargas.
- Aserrado tardío de la junta.

Grietas transversales: Grietas predominantemente perpendiculares al eje de la calzada (Figura B.13 y B.14).

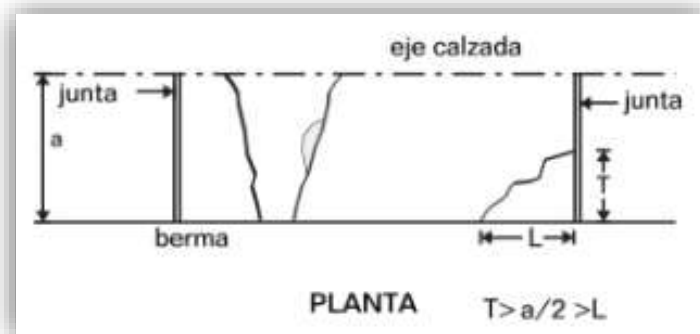


Figura B.13. Diagrama descriptivo de una grieta transversal.

También pueden extenderse desde una junta transversal hasta el borde del pavimento, siempre que la intersección con la junta esté a una distancia del borde mayor que la mitad del ancho de la losa y la intersección con el borde se encuentre a una distancia inferior que la mitad del ancho de la losa.



Figura B.14. Grieta transversal.

Causas Posibles:

- Losas de longitud excesiva.
- Junta de contracción aserrada o forma tardíamente.
- Espesor de la losa insuficiente para soportar las solicitaciones.
- Retracción térmica que origina alabeos.

III Deterioro Superficial:

Fisuramiento por retracción tipo malla: Grietas capilares (fisuras) limitadas sólo a la superficie del pavimento. Frecuentemente, las grietas de mayores dimensiones se orientan en sentido longitudinal y se encuentran interconectadas por grietas más finas distribuidas en forma aleatoria (Figura B.15).

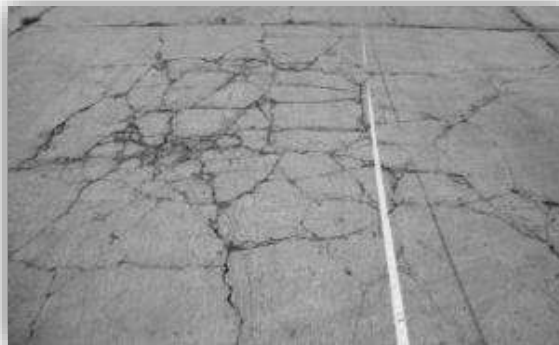


Figura B.15. Fisuramiento por retracción tipo malla.

Causas Posibles:

- Curado del hormigón inapropiado.
- Exceso de amasado superficial y/o adición de agua durante el aislado de la superficie.
- En zonas de clima frío; acción del clima o de productos químicos cuando el hormigón fue mal construido.

Agrietamiento por durabilidad: Agrietamiento caracterizado por grietas finas muy cercanas y con forma de un cuarto de luna (Figura B.16).

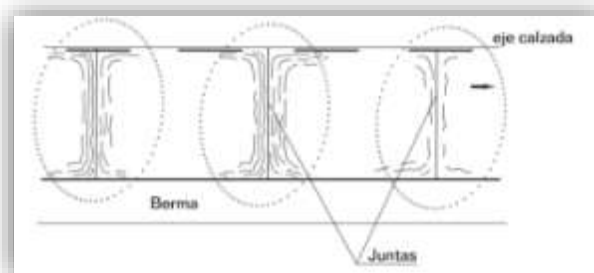


Figura B.16. Diagrama descriptivo del agrietamiento por durabilidad.

Ocurre en las inmediaciones de las juntas, grietas o bordes del pavimento; se inicia en las esquinas de las losas.

La zona agrietada y la circunvecina presentan una coloración oscura.

Causas Posibles:

- Reactividad álcali-sílice de los agregados que conforman el hormigón, cuando estos se congelan y expanden.

IV Otros Deterioros:

Levantamiento localizado: Levantamiento de la parte de la losa, localizado a ambos lados de una junta transversal o grieta. Habitualmente el hormigón afectado se quiebra en varios trozos (Figura B.17 y B.18).

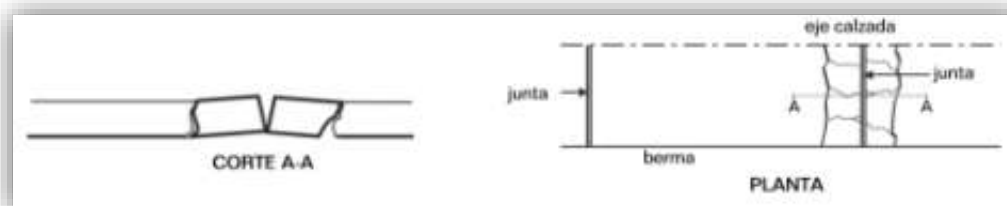


Figura B.17. Diagrama descriptivo del levantamiento localizado.



Figura B.18. Levantamiento localizado.

Causas Posibles:

- Variaciones térmicas cuando la longitud de las losas es excesiva y no cuenta con juntas de expansión.
- En pavimentos con barras de traspaso de cargas, mala colocación de estos elementos.
- Presencia de un estrato de suelos expansivos a poca profundidad.

Escalonamiento de juntas y grietas: Desnivel entre dos superficies del pavimento, separadas por una junta transversal o grieta (Figura B.19 y B.20).

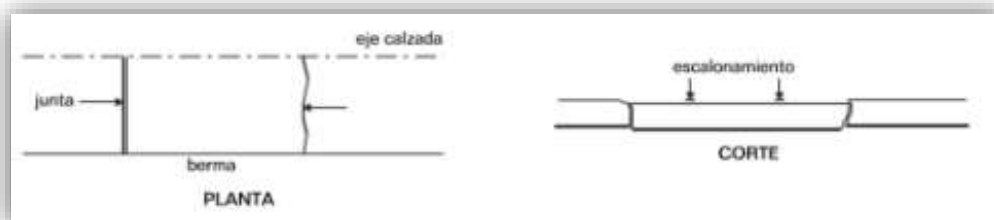


Figura B.19. Diagrama descriptivo del escalonamiento de juntas y grietas.



Figura B.20. Escalonamiento en junta.

Causas Posibles:

- Erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta.
- Deficiencia en el traspaso de cargas entre las losas o trozos de losas.
- Asentamiento diferencial de la subrasante.
- Drenaje insuficiente.

Parches deteriorados: Área superior a 0.1 m² o losa completa que ha sido removida y reemplazada por un material que puede ser hormigón o asfalto y que se encuentra deteriorada (Figura B.21 y B.22).

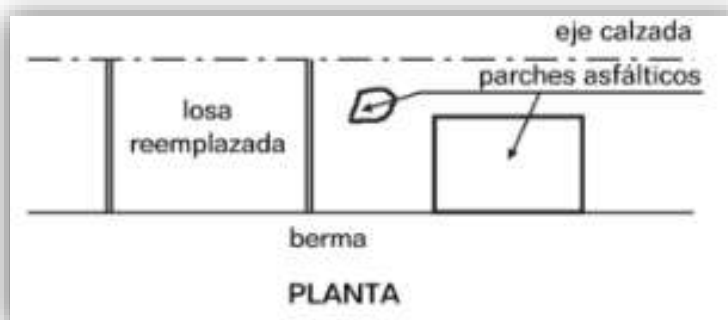


Figura B.21. Diagrama descriptivo de un parche deteriorado.

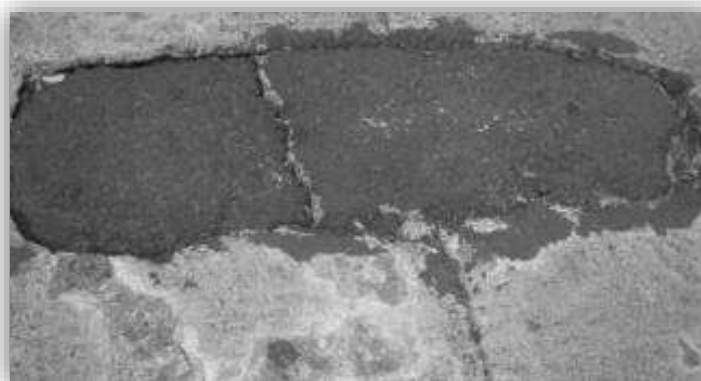


Figura B.22. Parche deteriorado.

Causas Posibles:

- En el caso de parches asfálticos, capacidad estructural insuficiente del parche o mala construcción del mismo.
- En reemplazo existente, insuficiente traspaso de cargas en las juntas de contracción o mala construcción.
- En parches con hormigón de pequeñas dimensiones, inferiores a una losa, retracción de fraguado del hormigón del parche que lo despega del hormigón antiguo.

Fragmentación múltiple: Área superior a 0.1 m^2 y hasta losas completas que presentan múltiples grietas abiertas que dan origen a numerosos trozos separados (Figura B.23 y B.24).

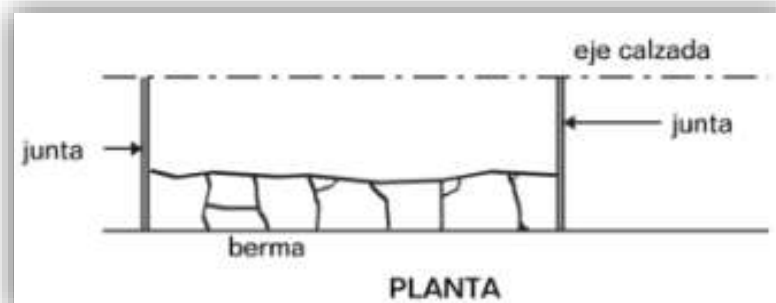


Figura B.23. Diagrama descriptivo de fragmentación múltiple.



Figura B.24. Fragmentación múltiple.

Causas Posibles:

Corresponde a una etapa de deterioro muy avanzado de grietas de esquina, grietas longitudinales o transversales o una combinación de ellas; normalmente por las grietas penetra el agua, por lo que también se da la surgencia.

Ficha representativa de la inspección visual de los pavimentos de la zona sur de la ciudad de Morelia.

Colonia:	Fracc. Paseo de la Hacienda	Calle:	Cto. Hacienda Cantabrisa
Tipo de pavimento:	Rígido	Cuadra N°:	1
Longitud de cuadra:	158.75 m	Ancho de corona:	8.30 m

JUNTAS				
Deficiencias del sellado				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Juntas transversales saltadas				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Separación de la junta longitudinal				
Longitud de junta (m): 158.75 m				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio: X		Alto:

GRIETAS				
Grietas de esquina				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Grietas longitudinales				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Grietas transversales				
Nivel de Severidad :				
Bajo:		Medio:		Alto: X

DETERIORO SUPERFICIAL				
Fisuramiento por retracción (tipo malla)				
Nivel de Severidad:				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Agrietamiento por durabilidad				
Nivel de Severidad : <u>NQ PRESENTA</u>				
Bajo:		Medio:		Alto:

OTROS DETERIOROS				
Levantamiento localizado <u>NQ PRESENTA</u>				
No. De levantamientos:		Altura de levantamiento:		
Escalonamiento de juntas y grietas				
Nivel de Severidad: <u>NQ PRESENTA</u>				
Bajo:		Medio:		Alto:
Parches deteriorados				
Nivel de Severidad:				
Bajo:		Medio:		Alto: X
Fragmentación múltiple				
Presencia de fragmentación:				
Si:	X	No:		

OBSERVACIONES:

Esta calle fue medida de oeste a este.

En general se encuentra en mal estado, presenta grietas en todos los sentidos, con una severidad alta, ausencia de sello en las juntas, juntas saltadas y parches deteriorados.



Fragmentación múltiple y grieta de esquina. Fragmentación múltiple y parche deteriorado.



Deterioros múltiples.

Referencias

- Ana S. Figuero Infante, C. F. (s.f.). Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (Pavimentada y en afirmado). *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Areny, R. P. (1998). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Boixareu.
- H., W. J. (1990). *Measurements, specifications and achievement of smoothnes for pavement construction*. Whasinton, D.C: National Cooperative Highway Research Program Systhesis of Highway practice 167.
- Herrera, J. F. (2016). *Desarrollo de software para el cálculo de IRI*.
- iberoamerica, C. d. (2002). *Cátalogo de deterioros de pavimentos rígidos*.
- Ignacio Sánchez, S. Y. (1989). El IRI: Un indicador de la regularidad superficial. *Revista de ingeniería en construcción N.6*.
- Instituto del Concreto. (1997). *"Manual Tecnología y Propiedades"* (Tercera reimpresión ed.). (A. c. ASOCRETO, Ed.) Colombia.
- Instituto Mexicano del Transporte, S. d. (1991). *Catalogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras*. Querétaro.
- Instruments, N. (2008). Instrumentación virtual e instrumentación tradicional. *National Instruments*.
- Karamihas, M. W. (1998). *The little book of profiling*.
- López, I. O. (2007). *Análisis de diferentes metodologías para evaluar la rugosidad en Pavimentos y su aplicación a la red carretera nacional*.
- Mario C. Arriaga Patiño, P. G. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México. P.T. 108*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte y Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Mendoza, D., Brito Benitez, E. L., & Arenas Alatorre, J. A. (2004). In D. Mendoza, E. L. Brito Benitez, & J. A. Arenas Alatorre, *La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología* (pp. 156-159).
- Metrology, I. V. (2008). Basic and general concepts and associate terms (VIM).
- Michal W. Sayers, T. D. (1986). *The International Road Rougness Experiment*. Washinto, D.C. U.S.A: World Bank technical paper number 45.

- Molina, M. J. (2008). *Teoría de la Equivalencia Global* (Vol. III). Molwik.
- Montenegro, J. J. (1999). *Evaluación de las condiciones superficiales de una carretera por medio de un equipo de respues mecánica*. Morelia.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción – agua para concreto – especificaciones*.
- R. W. Perea, S. K. (2002). *Issues in pavement smoothness a summary report*. National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Rsearch Council.
- S. M. Karamihas and T. D. Gillespie, S. K. (1999). *Guidelines for longitudinal pavement profile measurement*. National Cooperative Highway Reseaarch Program Transportation Research Board National Rsearch Council.
- Schwab, K. (2014). The Global Competitiveness Report. *World Economic Forum*.
- Vargas, G. A. (2010). Aspecto y consideraciones importantes en el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI). *Ingeniería*.