

Diseño, construcción y funcionamiento de un prototipo para medir cargas vehiculares en un pavimento flexible

Design, construction and operation of a prototype to measure load in a flexible pavement structure

Hugo Rondón¹*, Eduardo Delgado*, Wilson Vargas*

* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 20/03/2013

Fecha de Aceptación: 01/11/2013

PAG 71-86

Resumen

El artículo presenta el diseño y la construcción de un prototipo con el cual es posible medir cargas vehiculares en un pavimento flexible, a partir de las vibraciones que dichos vehículos generan cuando se movilizan sobre esta estructura vial. El principio físico es simple: cuando un vehículo circula sobre la superficie de un pavimento, éste genera vibraciones que pueden ser percatadas en zonas adyacentes a la vía en estudio, y las amplitudes de dichas deformaciones pueden dar información sobre la magnitud de la carga rodante. Adicionalmente, se reportan los resultados de un estudio de campo ejecutado con el fin de calibrar una ecuación matemática que simula las señales de vibración obtenidas con el prototipo. De manera general se concluye que el prototipo es capaz de predecir la carga que circula sobre el pavimento a partir de las vibraciones que éstos inducen cuando transitan sobre la capa de rodadura.

Palabras claves: Espectros de carga, pavimentos, vibraciones, pesaje en movimiento, tránsito

Abstract

This paper presents the design and construction of a prototype able to measure weigh-in-motion on a flexible pavement structure, through the vibrations generated when vehicles move on these road structures. The physical principle is simple: when a vehicle is moving across the pavement road surface, it creates vibrations that can be noticed in areas adjacent to the analyzed highway and the amplitudes of these vibrations can provide information on the magnitude of the vehicle load. Additionally, the paper reports the results of a field study performed in order to calibrate a mathematical equation which simulates the vibration signals obtained by the prototype when vehicles move across the road surface. As a general conclusion, the prototype is able to predict the load that is moving on the pavement, through the vibrations that they induce when transiting on its surface.

Keywords: Spectral load, pavements, vibration, weight in motion – WIM, transit

1. Introducción

Una de las principales variables del diseño de estructuras de pavimentos es el tránsito. Esta variable se calcula realizando el conteo y pesaje de vehículos y ejes de carga que circulan por una vía durante un período determinado de tiempo (generalmente una semana), para luego ser proyectados al período de diseño con el fin de estimar el número de ejes de carga que circulará por la vía durante la vida útil de la estructura de pavimento. Cada eje de carga puede presentar peso, configuraciones y presiones de inflado de llanta diferentes los cuales aportan a la estructura un grado de agresividad y deterioro (medido principalmente en términos de fatiga, ahuellamiento y erosión) distinto. Por lo anterior, por lo general, para el cálculo de la variable tránsito, este grado de agresividad de cada eje de carga se convierte al que en teoría producirá un eje estándar equivalente de 8,2 t. (este eje es derivado de los resultados de los tramos de prueba construidos y monitoreados por la AASHO Road Trials, 1961 en el estado de Illinois, Estados Unidos y sobre los cuales se fundamenta la metodología de la AASHTO, 1986, 1993).

1. Introduction

Traffic is one of the main variables considered for pavement structures design. This variable is calculated by measuring and weighing vehicles in motion and load axles travelling on a road, during a given period of time (usually one week). Afterwards, these data is calculated by pavement design, so as to determine the number of axles travelling on the road during the complete pavement life span. Each load axle can represent weight, configurations and different tires inflation air pressures, which provide certain degree of aggressiveness and damage (generally measured in terms of fatigue, rutting and erosion). Therefore, in general, for the calculation of the transit variable, this aggressiveness degree of each load axle will theoretically produce a standard axle equivalent to 8.2 t (this axle is derived from results provided by test segments controlled and monitored by AASHO Road Trials, 1961 in Illinois, United States, which are the base of AASHTO methodology, 1986, 1993).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Profesor Asociado, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

E-mail: harondong@udistrital.edu.co



Una nueva metodología para evaluar el grado de desempeño de los pavimentos es utilizar como variable tránsito espectros de carga. De acuerdo con Castellanos y Rojas (2005), los espectros de carga son la representación gráfica de la carga por eje que hace uso de la vía en un período determinado de tiempo, y se representan por medio de histogramas que son desagregados por cada tipo de vehículo que circula por la vía. Esta variable está siendo utilizada por metodologías recientes para el diseño de pavimentos como por ejemplo la MEPDG (2004) (Prozzi y Hong, 2007, 2007a; Lu et al., 2009; Wang et al., 2011; Haider et al., 2012; Nassiri et al., 2013) y podría en un futuro desplazar la forma tradicional de cálculo en ejes equivalentes de 8,2 t. Con los espectros de carga se tiene en cuenta que sobre un pavimento las cargas que circulan tienen diferentes magnitudes y configuraciones (algunos ejemplos pueden ser consultados en Garnica & Correa, 2004 y Castellanos & Rojas, 2005).

En Colombia, el pesaje de vehículos de carga para el cálculo de la variable tránsito se realiza por medio de básculas. El anterior procedimiento tiene como principales desventajas (Benekohal et al., 2000):

- Se necesitan estaciones especiales de pesaje (por lo general fuera de las ciudades en los peajes).
- Es difícil el pesaje de los diferentes vehículos en puntos específicos sobre vías urbanas.
- El pesaje se realiza de manera estática y se observa la distribución por eje, más no el impacto dinámico del conjunto de ejes de carga.
- Procedimiento lento, costoso y peligroso en carreteras de alto flujo vehicular (Zhang et al., 2008).
- En algunas ocasiones, vehículos circulando con exceso en su peso máximo permitido de carga no pueden ser identificados, debido a que los operadores de dichos vehículos conocen el sitio exacto en donde se realiza la medición de la carga y desarrollan estrategias para no ser identificados. Lo anterior genera un incremento en el riesgo de accidentes de tránsito y mayor daño a las estructuras viales (Jacob y de La Beaumelle, 2010).

Para poder solventar las anteriores deficiencias se propuso diseñar y construir un prototipo que pueda medir la magnitud y el número de cargas que circulan sobre un pavimento, por medio de la vibración que generan dichas cargas cuando se mueven sobre la superficie de rodadura. El principio físico es simple: cuando un vehículo circula sobre la superficie de un pavimento, éste genera vibraciones que pueden ser percatadas en zonas adyacentes a la vía en estudio, y las amplitudes de dichas vibraciones pueden dar información sobre la magnitud de la carga rodante. El mismo principio ha sido utilizado en algunos estudios en Bogotá D.C. para evaluar el grado de deformabilidad de puentes por medio de la utilización de acelerómetros, y en Buenos Aires (Kantor & Pérsico, 2005) para evaluar el efecto que produce la vibración proveniente de cargas vehiculares sobre el comportamiento estructural de edificaciones.

A new methodology for the assessment of pavement performance level uses load spectrums as a traffic variable. In accordance with Castellanos and Rojas (2005), load spectrums are a graphical representation of load per axle travelling on a road, for a given period of time. They are represented by histograms, which are disaggregated per each vehicle type moving across the road. This variable has been employed in recent methodologies for pavement design, for instance: MEPDG (2004) (Prozzi and Hong, 2007, 2007a; Lu et al., 2009; Wang et al., 2011; Haider et al., 2012; Nassiri et al., 2013). This variable could replace the traditional calculation method for equivalent axles of 8.2 t in the near future. Spectral loads consider that loads travelling on a pavement surface have different magnitudes and configurations (some examples may be reviewed on Garnica & Correa, 2004 and Castellanos & Rojas, 2005).

In Colombia, load vehicles weighing used for the calculation of the traffic variable is carried out by using weighing machines. Above procedure has the following disadvantage (Benekohal et al., 2000):

- *Special weighing facilities are required (generally at toll booths located out of town).*
- *It is difficult to weigh different vehicles at specific points on urban roads.*
- *Weighing is carried out in a static manner. Distribution per axle is considered, but not the dynamical impact of the load axles set.*
- *It is a slow, expensive and dangerous procedure on high traffic highways (Zhang et al., 2008).*
- *Sometimes vehicles exceeding the allowed load limit cannot be identified, because their drivers know the position of load weighing facilities and develop strategies to avoid being noticed. This fact increases vehicles accident probabilities and provokes great damages to road structures (Jacob and de La Beaumelle, 2010).*

In order to solve above problems, authors proposed to design and build a prototype capable of measuring the magnitude and the amount of load travelling on a pavement road, by means of vibrations generated by such loads when moving across a tread layer. The physical principle is simple: when a vehicle moves across a pavement surface, it generates vibrations that can be detected by the analyzed road adjacent zones. The amplitudes derived from such vibrations are able to provide information about live-load magnitude. The same principle has been employed by some studies, developed in Bogota D.C., to evaluate bridges deformability by using accelerometers and; in Buenos Aires (Kantor & Pérsico, 2005) to evaluate the effect produced by vibration generated by vehicular loads on buildings structural behavior.



Los resultados reportados en el presente artículo son los concernientes a la primera fase de una investigación que busca diseñar y construir una herramienta (prototipo) que permita estimar las cargas que circulan sobre un pavimento de tipo flexible sin tener que detener el tránsito vehicular. Para tal fin, las amplitudes de carga que los vehículos generan sobre las vías son calculadas utilizando las amplitudes de vibración que los mismos producen cuando circulan sobre la superficie del pavimento. Futuras fases de la investigación buscarán perfeccionar el prototipo con el fin de que éste pueda medir de manera confiable, las cargas que circulan sobre cualquier estructura de pavimento flexible sometida a los diversos factores que pueden afectar las mediciones (condiciones del medio ambiente, estado del pavimento, tipo de carga, etc.). Con el diseño y construcción del prototipo se busca desarrollar una nueva tecnología y metodología para la estimación de la carga vehicular que circula sobre estructuras de pavimento flexible en Colombia. Adicionalmente el prototipo servirá para:

1. Detectar la circulación ilegal de camiones que sobrepasen las cargas máximas permitidas por el Ministerio de Transporte en Colombia.
2. Reunir información que pueda ser utilizada por las instituciones que planean y administran la malla vial en Colombia.

Inicialmente el artículo presenta de manera resumida los equipos más utilizados en el mundo para estimar cargas en pavimentos, para luego describir brevemente el prototipo desarrollado y los resultados obtenidos de utilizarlo en campo sobre una estructura de pavimento flexible (este tipo de estructura fue escogida debido a que es la más construida en Colombia). Por último se presenta una ecuación matemática con la cual es posible predecir la masa o carga que circula sobre el pavimento con base en las vibraciones que los vehículos generan cuando se movilizan.

2. Sistemas de Medición en el Mundo

Diversos sistemas han sido implementados en el mundo con el fin de estimar las cargas que circulan sobre pavimentos. Los más utilizados son aquellos en los cuales se puede estimar la cantidad y magnitud de carga vehicular sin tener que parar el tránsito. A este tipo de tecnología se les denomina "peso en movimiento" (WIM por sus siglas en inglés). El estado actual del conocimiento en esta área es que a pesar que la tecnología WIM ha sido estudiada desde la década de los 50's, aún no se ha podido determinar una configuración definitiva de un equipo que pueda predecir con exactitud la magnitud y distribución de las cargas rodantes sobre una vía (COST 323, 1999; Liu et al., 2006; Prozzi et al., 2008; Haider et al., 2012). A pesar de sus amplias ventajas técnicas para la determinación de cargas vehiculares en movimiento sobre estructuras viales, presentan como principales desventajas, que las técnicas actuales son costosas de instalar y mantener, y experimentan baja precisión (Prozzi y Hong, 2007, 2007a; Zhang et al., 2008). Adicionalmente, en algunas ocasiones, esta tecnología subestima las cargas impuestas por el parque automotor lo que genera una sobrestimación de la vida útil de las estructuras viales (Haider et al., 2012).

Results reported by the present study correspond to the first stage of a research intended to design and build a prototype tool capable of calculating the loads moving across a flexible pavement road without stopping vehicular traffic. Load amplitudes generated by vehicles on the road, are calculated by using vibration amplitudes they produce when travelling on a pavement surface. Future stages of this research will focus in improving the prototype, so that it will be able to measure, in a more reliable way, the loads traveling on any flexible pavement structure exposed to different factors that might affect measurements (environmental conditions, pavement condition, load types, etc.). By designing and building the prototype, authors intend to develop a new technology to calculate vehicular load moving across flexible pavement structures in Colombia. Additionally, the prototype will help to:

1. *Detect illegal circulation of trucks exceeding maximum loads allowed by the Transportation Ministry in Colombia.*
2. *Collect information that might be used by organizations that design and manage roads network in Colombia.*

This paper initially presents a summary of the most popular devices employed worldwide to estimate pavement loads. Then, authors briefly describe the developed prototype and the results obtained from its on-site utilization on a flexible pavement structure (this kind of structure was chosen because it is the most available in Colombia). Finally, a mathematical equation is introduced, which calculates mass or load moving across the pavement, based on vibrations generated by vehicles in motion.

2. Measurement Systems available Worldwide

Diverse systems have been implemented worldwide in order to calculate loads travelling on pavement structures. The most popular systems are the ones calculating the amount and magnitude of vehicular load without stopping traffic circulation. This kind of technology is known as "weigh in motion" (WIM). The present state of the art knowledge in this area is that, although WIM technology has been studied since the 50's, it has not been possible to determine a definitive device configuration to accurately predict the magnitude and distribution of live-loads on a road (COST 323, 1999; Liu et al., 2006; Prozzi et al., 2008; Haider et al., 2012). In spite of its great advantages for the determination of vehicular loads moving across road structures, WIM has some disadvantages: current available techniques are not easy to install and to maintain and they are not accurate enough (Prozzi and Hong, 2007, 2007a; Zhang et al., 2008). Furthermore, in some occasions, this technology underestimates loads imposed by the fleet of vehicles, thus leading to an overestimation of road structures life-span (Haider et al., 2012).



Existen diversos tipos de sensores WIM. Los más utilizados en estudios viales son: placas en flexión, celdas de carga, sensores piezoeléctricos, de capacitancia y fibras ópticas (Teral, 1998; Nikolaidis, 2002; Wang, 2005; Yannis y Antoniou, 2005; Cheng et al., 2007).

Una placa en flexión es una placa de acero con galgas de deformación colocados en la zona inferior de la misma (Figura 1). Cuando un vehículo pasa sobre la superficie de la vía, la deformación inducida por la carga vehicular puede ser medida y convertida a carga dinámica. Este tipo de sensor puede ser utilizado sobre vías con vehículos circulando a baja y alta velocidad. La precisión de las mediciones en campo utilizando este tipo de sensor es alta. Desventajas: dificultad para realizar su instalación y mantenimiento, y es un mecanismo costoso. Adicionalmente cuando se quieren realizar medidas sobre pavimentos flexibles es necesario construir una cimentación en concreto para soportar la placa en flexión (ver Figura 1).

There are several types of WIM sensors. The most employed by roads studies are: bending plate sensor, load cells sensor, piezoelectric sensor, capacitance sensors and optical fiber sensors (Teral, 1998; Nikolaidis, 2002; Wang, 2005; Yannis and Antoniou, 2005; Cheng et al., 2007).

A bending plate is a steel-made plate with strain gauges installed underneath the plate (Figure 1). When a vehicle is driven on the road surface, the strain induced by the vehicular load can be measured and turned into a dynamical load. This kind of sensor can be used on roads where vehicles run at high and low speed. The accuracy of measurements taken by this sensor on the road site is high. Disadvantages: the sensor is not easy to install nor easy to maintain and it is an expensive device. Additionally, when measures are carried out on flexible pavement structures, it is necessary to build a concrete foundation to support the bending plate sensor (see Figure 1).

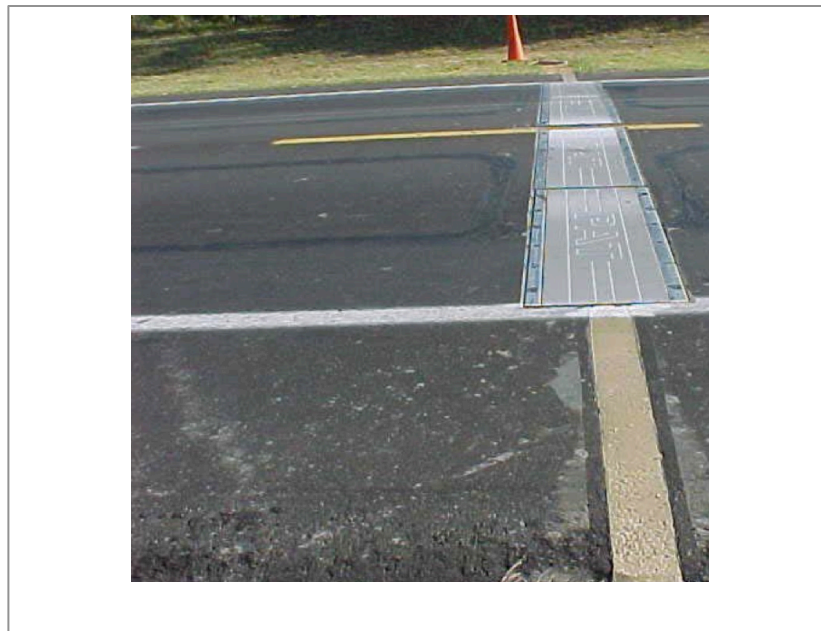


Figura 1. Placa en flexión (Florida Department of Transportation, 2007)

Figure 1. bending plate (Florida Department of Transportation, 2007)

De acuerdo con Liu et al. (2006), dentro de los sensores WIM, las celdas de carga son las más sensibles y exactas para medir cargas dinámicas. Este tipo de sensores se montan centralmente bajo un marco con cámara acorazada de acero que se encuentra dispuesta en la rasante de la vía. Estas celdas son colocadas de tal forma que las llantas de los neumáticos de los vehículos circulen sobre ellas. Es un mecanismo costoso y difícil de instalar. La pieza del sensor con la que se mide la carga (celda) y el circuito donde se instala se presenta de manera esquemática en la Figura 2.

According to Liu et al. (2006), load cells sensors are the most sensitive and accurate devices to measure dynamical loads, among WIM sensors. These kinds of sensors are assembled in the center under a framework with an armored steel camera located on the road grade beam. Cells are assembled in such a way that vehicle wheel rims will circulate on them. This is an expensive and difficult to install device. The cell that measures load and the circuit where it is installed is schematically shown by Figure 2.

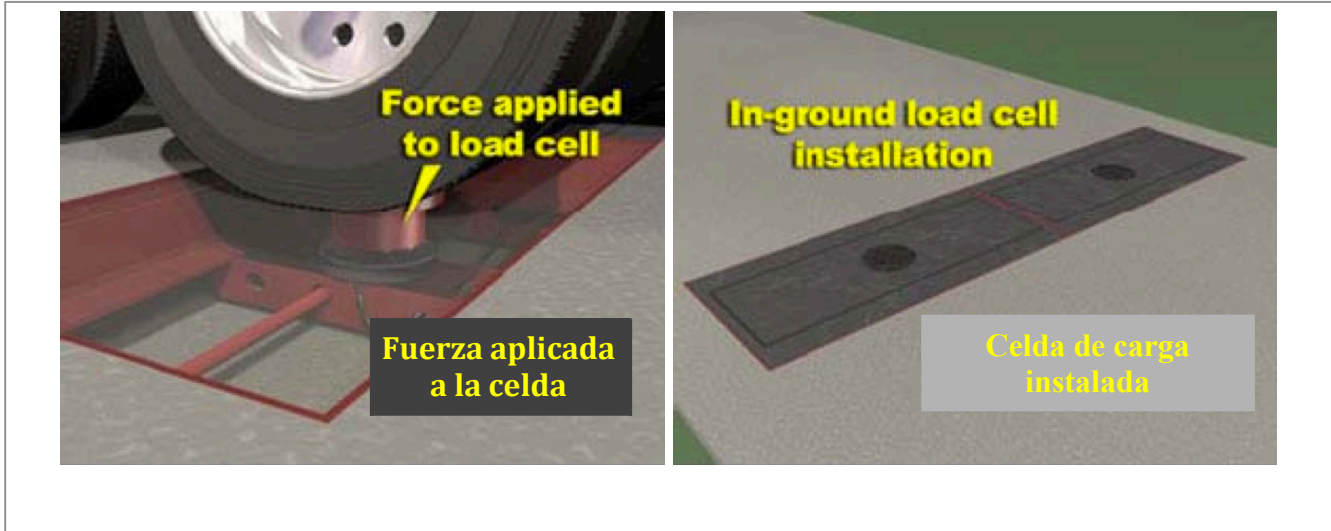


Figura 2. Esquema de celdas de carga. Liu et al. (2006)
Figure 2. Load cells scheme. Liu et al. (2006)

El sensor piezoeléctrico (Figura 3) se utiliza por lo general, para medir cargas a altas velocidades. A bajas velocidades o bajo cargas estáticas, las mediciones de este tipo de sensor son bastante deficientes. Las principales ventajas de este sensor son sus bajos costos de operación en comparación con los otros tipos, y su facilidad de uso e instalación. La principal desventaja de utilizar sensores piezoeléctricos es que normalmente las mediciones no son tan exactas. Estos sensores son fabricados con un material que genera una carga eléctrica cuando es mecánicamente deformado. Su nombre proviene del griego *piezo* que significa yo aplico presión. Este tipo de sensor puede ser instalado dentro del pavimento para uso permanente o colocado en la vía dentro de un mecanismo portable.

The piezoelectric sensor (Figure 3) is generally employed to measure loads at high speed. At low speed or low static loads, measurements carried out by this device are quite unsatisfactory. The main advantages of this sensor are the low operational costs, in comparison to other devices, and it is easy to install and easy to work with. The main disadvantage of using piezoelectric sensors is that their measurements are usually not accurate enough. This sensor is made of a material that generates static charge when it is mechanically strained. Its name comes from the Greek word *piezo* that means "I apply pressure". This type of sensor can be installed inside the pavement for use on permanent basis or, installed on the road to be used as a portable device.



Figura 3. Sensor piezoeléctrico. Liu et al. (2006)
Figure 3. Piezoelectric sensor. Liu et al. (2006)

Normalmente, materiales piezoeléctricos son compuestos de cadenas moleculares de polímeros como fluoruro de polivinilideno, cerámicas o cristales como el cuarzo. Los sensores piezoeléctricos son comúnmente coaxiales con una base de metal y un material piezoeléctrico recubierto por una capa externa de metal (Martin et al., 2003).

Un sensor de capacitancia (Figura 4) presenta dos o más placas metálicas colocadas de manera paralela, entre las cuales se colocan conductores eléctricos con cargas diferentes. Cuando un vehículo se mueve sobre este tipo de sensor, la distancia entre las placas decrece y la capacitancia incrementa. Con esta información de distancia y capacitancia es que se obtiene la estimación de la carga del eje que circula sobre la vía. Generalmente los materiales usados para fabricar estos mecanismos son acero inoxidable, aluminio, poliuretano y caucho.

Normally, piezoelectric devices are composed by polymer molecular chains, such as polyvinylidene fluoride, ceramics or crystals like quartz. Piezoelectric sensors are usually coaxial with a metal base and piezoelectric material covered by an external metal layer (Martin et al., 2003).

A capacitance sensor (Figure 4) has two or more metallic plates installed in parallel, electric conductors at different loads are installed between them. If a vehicle presses this sensor, the distance existing between plates decreases but capacitance property increases. Given such information on distance and capacitance, the calculation of axle load circulating on the road is obtained. Generally, the materials used to elaborate such elements are stainless steel, aluminum, polyurethane and rubber.



Figura 4. Sensor de capacitancia. Liu et al. (2006)
Figure 4. Capacitance sensor. Liu et al. (2006)

Los sensores de fibra óptica tienen como principal ventaja que pueden ser utilizados en lugares donde otros sensores WIM pueden ser afectados o no utilizados (p.e., puentes, cerca de ferrovías o en centrales eléctricas) (Yannis y Antoniou, 2005). Adicionalmente, la fibra óptica presenta mejores resultados y exactitud en la estimación de cargas rodantes en comparación con equipos piezoeléctricos (Federal Highway Administration, 2001). Una representación esquemática de fibra óptica se presenta en la Figura 5.

The main advantage of optical fiber sensors is that they can be employed where other WIM sensors cannot (for example bridges, near train ways or near power stations) (Yannis and Antoniou, 2005). Besides optical fiber yields better results and accuracy when calculating live- loads, in comparison to piezoelectric devices (Federal Highway Administration, 2001). A scheme of optical fiber sensor is shown by Figure 5.

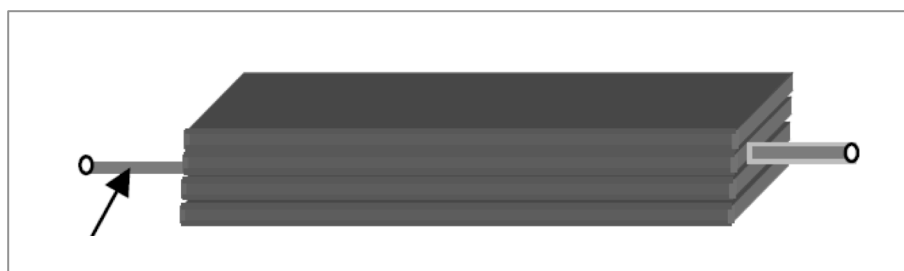


Figura 5. Fibra óptica. Gan et al. (2008)
Figure 5. Optical fiber sensor. Gan et al. (2008)

Estados del conocimiento y bibliografía más descriptiva sobre el tema pueden ser consultados en ASTM (1994), Cropley (1996), Bushman y Pratt (1998), Whitford (1998), Peters y Koniditsiotis (2000), Beckett et al. (2010).

3. Descripción del Prototipo

En el diagrama de bloques de la Figura 6, se pueden distinguir las etapas que se llevaron a cabo para realizar el prototipo. En esta figura se pueden distinguir cinco etapas principales: el sensor, acondicionamiento de la señal, conversor análogo a digital, el procesador PSOC el cual realiza la adquisición, adecuación, procesamiento de la señal del sensor utilizado para medir el espectro de carga, y el PC.

The state of the art knowledge and more detailed bibliography about this subject may be reviewed on ASTM (1994), Cropley (1996), Bushman and Pratt (1998), Whitford (1998), Peters and Koniditsiotis (2000), Beckett et al. (2010).

3. Description of prototype

The block diagram on Figure 6 shows the stages developed to build the prototype. In this figure, five main stages are shown: sensor, signal conditioning, a/d converter; PSoC processor (which carries out data collection, adaptation, and it processes the sensor signal to measure load spectrum) and PC.

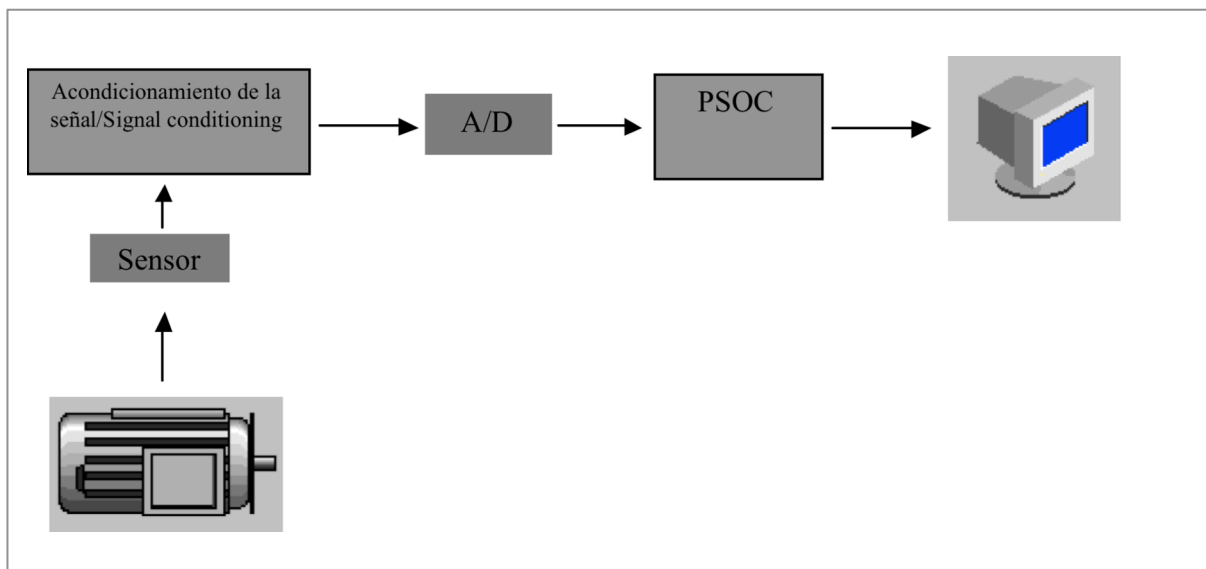


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de monitoreo
Figure 6. Blocks diagram of monitoring system

El sensor utilizado es un acelerómetro tipo mems MMA7260QT de freescale semiconductor de tres ejes, el cual entrega una señal analoga, con una sensibilidad de 66mv por gravedad, este sensor es capaz de medir aceleraciones desde 0.1g hasta 6g y opera en un rango de voltaje de 2.4v a 3.6v. El diseño del acelerómetro posibilita obtener una señal eléctrica proporcional a la aceleración de la superficie donde haya sido fijado éste.

Los sistemas programables en un chip, también conocidos como PSoC (Programmable System-on-Chip), constituyen un arreglo configurable de 'señal mezclada' (parte analógica y digital) con controlador en una tarjeta. Estos dispositivos conjugan las ventajas de los SoC, con la flexibilidad de los sistemas programables. Estos microcontroladores han sido diseñados para substituir a los múltiples y tradicionales MCU por un único dispositivo programable de bajo coste. Los PSoC incluyen bloques configurables tanto analógicos como digitales, configurables mediante software. Esta arquitectura permite al usuario crear configuraciones de periféricos optimizados para los requerimientos de cada "Embedded Systems".

The sensor employed is an accelerometer of type mems MMA7260QT free-scale semiconductor of three axes, which provide an analog signal with a sensitivity of 66mv per gravity. This sensor is capable of measuring accelerations from 1.0g up to 6g. It operates within a voltage range varying from 2.4v to 3.6v. The accelerometer design is capable to obtain an electric signal, which is proportional to the acceleration on the surface it has been installed.

The programmable systems-on-chip (PSoC) are a configurable "mixed signal array" (partly analogical and digital), controlled by a board. Such devices combine the advantages of SoC, with the flexibility of programmable systems. These microcontrollers have been designed to replace multiple and traditional MCU by a single programmable device, at low cost. The PSoC include analogical and digital programmable blocks configured by software. This architecture allows the user to create optimized peripheral configurations to meet the requirements of each "Embedded System".



Adicionalmente, una CPU rápida, una memoria flash programable, una memoria de datos SRAM y puertos E/S configurables están incluidos.

Para el desarrollo del prototipo fue necesario parametrizar la señal que se obtiene por medio del acelerómetro de las vibraciones producidas sobre el pavimento cuando circulan los vehículos sobre la capa de rodadura. Se realizaron mediciones de la señal de salida del acelerómetro obteniendo señales como las que se ilustran en la Figura 7.

Besides, a powerful CPU, programmable flash memory, SRAM data memory and programmable E/S ports are included.

For the development of this prototype, it was necessary to standardize the signal obtained by the accelerometer, which captures the vibrations produced on the pavement surface when vehicles move across the tread-layer. Accelerator output signals were measured, thus obtaining signals as the one shown by Figure 7.

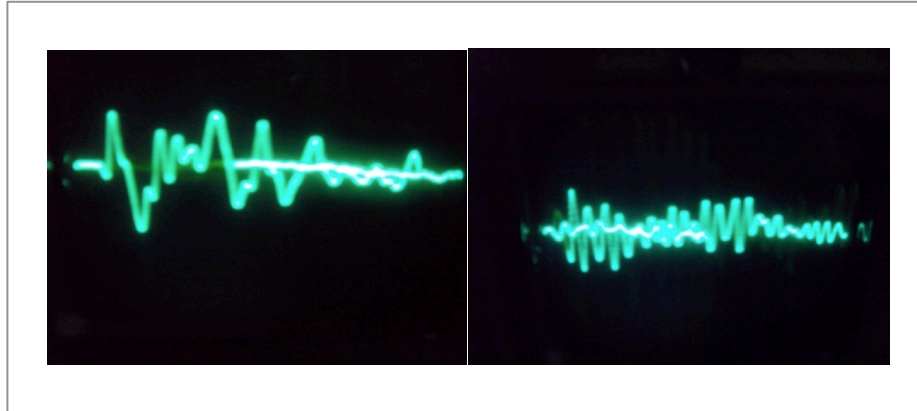


Figura 7. Señal del sensor
Figure 7. Sensor Signal

La amplitud de la señal obtenida por el acelerómetro es transmitida inalámbricamente hacia un PC para luego ser visualizada en un software de adquisición de datos utilizando el software LabView. La señal adquirida, entra al microcontrolador PSoC y se amplifica, se convierte de analógica a digital mediante el convertor A/D que posee el PSoC, posteriormente se filtra la señal y luego se transmite por el módulo de comunicación que posee el PSoC. En la Figura 8 se observa un diagrama de flujo del tratamiento de la onda en el PSoC.

Signal amplitude obtained by the accelerometer is wirelessly transmitted into a PC. The signal is then displayed by the PC screen by using the LabView data collection software. The acquired signal enters the PSoC microcontroller and is amplified, and then it turns from analogical into digital by using an A/D converter built in the PSoC. The signal is filtered and then transmitted by the data communication module in the PSoC. Figure 8 shows a flow diagram for the signal treatment in the PSoC.

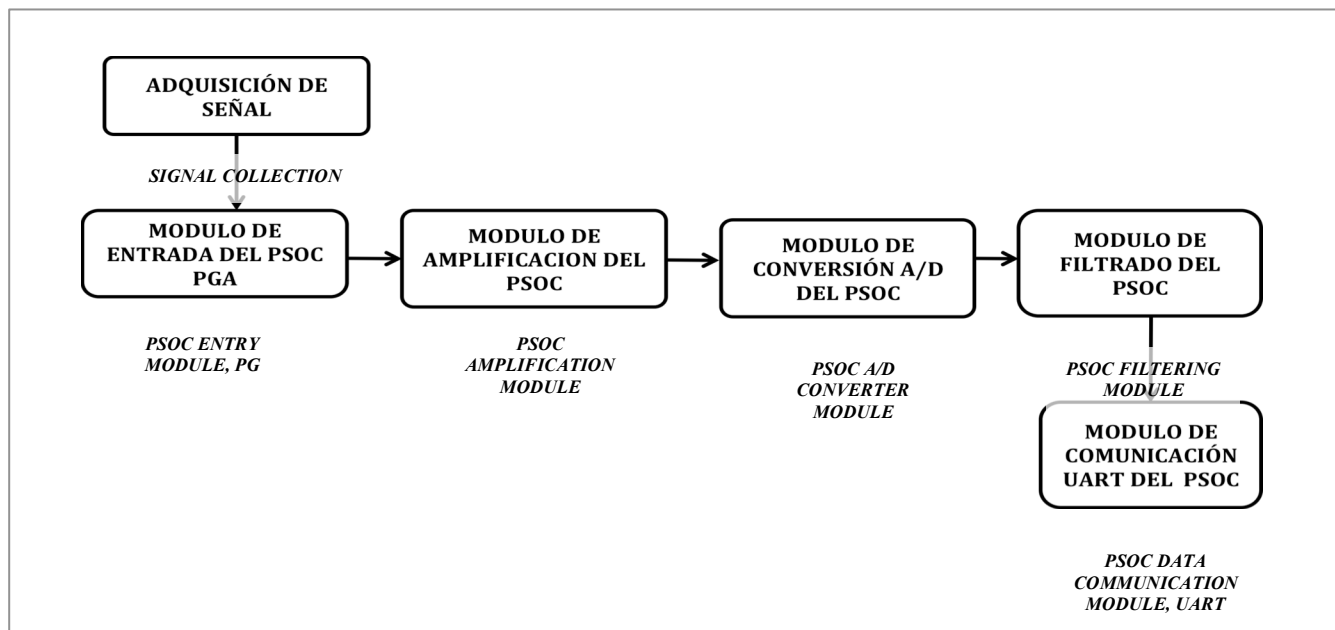


Figura 8. Diagrama de Flujo del tratamiento de la onda en el PSoC
Figure 8. Flow Diagram for the signal treatment in the PSoC



En la figura 9 se presenta el prototipo con todos sus componentes.

Figure 9 shows the prototype and its components.



Figura 9. Prototipo para la detección de vibraciones
Figure 9. Prototype Device developed to detect vibrations

4. Metodología

El proyecto fue ejecutado en cuatro fases.

Fase 1. Revisión bibliográfica. En esta etapa se recopiló y analizó información sobre la forma y la tecnología actual para medir espectros de carga en pavimentos.

Fase 2. Diseño y construcción del prototipo. Esta fase corresponde al diseño y construcción del prototipo para realizar las mediciones in situ. En esta fase se tuvieron en cuenta las variables intrínsecas (velocidad de circulación, distancia entre el vehículo y el prototipo, masa del vehículo, etc.), y extrínsecas (ruido de rodadura, lluvia y viento durante las mediciones, etc.) que podían incidir en las mediciones de vibración.

Fase 3. Fase experimental. Inicialmente fueron pesados cuatro tipos de vehículos (Automóvil marca Renault Logan, bus mediano denominado buseta y camiones tipo C2 y C3, ver Figura 10), con el fin de conocer con exactitud previa a los ensayos, su carga exacta. Para el pesaje se utilizó una báscula para camiones en posición estática propiedad de una planta de asfaltos. La carga de los vehículos analizados fueron 1113, 12334, 16355 y 26015 kg para el automóvil, la buseta, los camiones tipo C2 y C3 respectivamente.

4. Methodology

The project was developed in four phases.

Phase 1. Bibliographical review. This stage compiled and analyzed information about available procedures and technology to measure load spectrums on pavement structures.

Phase 2. Prototype design and construction. This stage corresponds to the prototype design and construction process to measure load spectrums on site. Intrinsic variables were taken into account during this phase (circulation speed, distance between the vehicle and the prototype, vehicle mass, etc.). Extrinsic variables were also considered (tread-layer noise, rain and wind taking place during measurements, etc.), which might affect vibrations measurements.

Phase 3. Experimental phase. Four heavy types of vehicles were weighed (Renault Logan car, middle size bus (usually called buseta) and trucks C2 and C3 type, see Figure 10) so as to accurately obtain the right amount of loads, before tests were applied. A truck weighing machine installed in static position, which is property of an asphalt company. The measured vehicles loads are 1113, 12334, 16355 and 26015 kg for the car, the middle size bus and trucks type C2 and C3, respectively.



El automóvil distribuye las cargas al pavimento en dos ejes simples compuestos de dos ruedas cada uno (una en cada esquina). El bus y el camión tipo C2 distribuyen la carga en dos ejes simples, uno delantero compuesto por dos ruedas (una en cada esquina) y el trasero compuesto por cuatro ruedas (dos en cada esquina). El camión tipo C3 distribuye la carga en un eje simple delantero compuesto por dos ruedas (una en cada esquina) y un eje tándem trasero compuesto por dos ejes articulados cada uno con cuatro ruedas (dos en cada esquina). Estos vehículos fueron escogidos debido principalmente a que son los que más circulan por las carreteras en Colombia y porque se quería evidenciar, en esta primera fase de la investigación, la sensibilidad del prototipo para medir las vibraciones de vehículos con cargas no tan elevadas.

The car distributes loads to the pavement from two simple axles, composed of two wheels each (one on each corner). The bus and C2 truck distribute loads from two simple axles; one forward axle composed by two wheels (one on each corner) and the rear axle composed by four wheels (two on each corner). C3 truck distributes load from a simple forward axle composed by two wheels (one on each corner) and a tandem rear axle composed by two articulated axles each, with four wheels (two on each corner). These vehicles were selected because they are the most driven type of vehicles moving across Colombian road network. Besides, authors wanted to evidence the prototype sensitivity when measuring vehicles vibrations produced by medium size loads, in this first research stage.

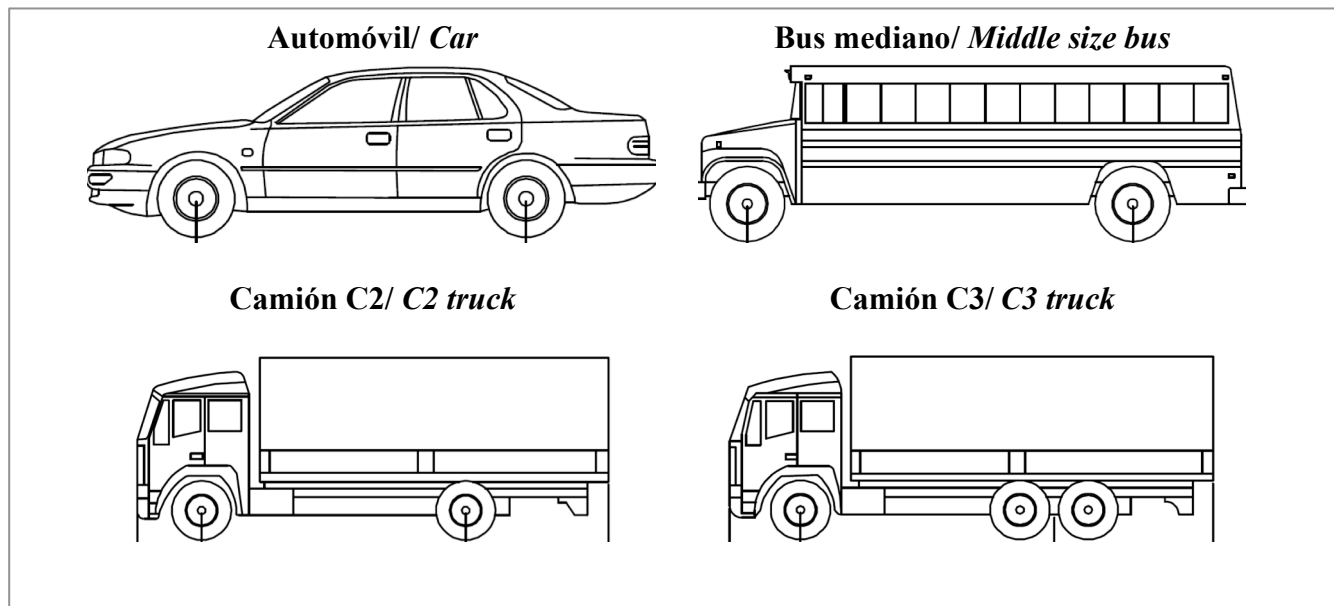


Figura 10. Vehículos tipo utilizados en el estudio
Figure 10. Vehicles employed by this study

Los vehículos durante el estudio, circularon sobre una estructura de pavimento recién construida compuesta por 12 cm de capa asfáltica, apoyada sobre 20 cm de base, 30 cm de subbase granular, 30 cm de afirmado y subrasante arcillosa tipo CL de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Esta estructura fue escogida debido a que la superficie se encontraba en perfectas condiciones de regularidad superficial y estado de serviciabilidad. Adicionalmente la vía se encontraba confinada por una berma de 60 cm de ancho, en cuyo eje central fue ubicado el prototipo. La temperatura ambiental promedio durante las pruebas fue de 20°C con día soleado.

Con el fin de evaluar la influencia de la distancia entre el prototipo y el eje de carga evaluado, los vehículos se hicieron transitar a aproximadamente 30, 60, 100 y 150 cm de distancia horizontal (D) entre la llanta más cercana del vehículo con el prototipo. A esas distancias los vehículos fueron movilizadas a 30, 60 y 100 km/h con el fin de evaluar la influencia de la velocidad (V). Para evitar que el viento producido por los vehículos a alta velocidad afectara las mediciones, entre el prototipo y el vehículo se colocó un elemento metálico de separación.

During the research, vehicles moved across a newly constructed pavement structure, which is composed of a 12 cm asphaltic layer, supported on 20 cm base, 30 cm granular sub-base, 30 cm gravel-surfaced, and CL clay type sub-grade according to the Standardized System for Soil Classification. This structure was selected because the surface was in perfect conditions regarding uniformity and serviceability. Additionally, the structure is confined by a 60 cm width-roadside; the prototype was installed on its center line. The average environment temperature was 20°C on sunny days, during experimental tests.

In order to assess distance influence between the prototype and the analyzed axle load, vehicles were made to move across at approximately 30, 60, 100 and 150 cm horizontal distance (D) between the closest vehicle wheel rim and the prototype. Vehicles were made to move across at such distances and at 30, 60 y 100 km/h in order to assess the speed influence (V). A metallic protection element was installed so as to avoid that wind produced by vehicles at high speed could affect measurements.



Se realizaron cinco mediciones para cada distancia y velocidad mencionada, y se tomaba, como dato representativo, para comparar con las cargas que circulaban sobre el pavimento, el promedio de la máxima amplitud de vibración en gravedades que imprimía cada eje cuando circulaba en frente del prototipo. Es decir, cada vehículo generaba dos magnitudes de amplitud de vibración (las cuales eran las promediadas) debido a que se tomaban las lecturas que experimentaba el sensor cuando circulaba el eje delantero y trasero del vehículo analizado. Esta fase experimental se llevó a cabo sobre una estructura de pavimento flexible.

Fase 4. Modelo matemático. Con los resultados obtenidos de la fase 3 se desarrolló una ecuación empírica regresional para estimar la carga que circula sobre el pavimento a través de la amplitud de vibración medida por el prototipo. Esta ecuación fue definida entre diversas ecuaciones, empleando los programas matemáticos TCWin y techdig.

5. Resultados

Las Figuras 11-14 presentan los resultados obtenidos de ejecutar la fase 3 descrita en el capítulo de metodología. Se observa un incremento obvio de los valores de amplitud de vibración a medida que el vehículo aumenta la carga y la velocidad de circulación. Adicionalmente se observa que dicha amplitud es mayor a medida que el vehículo circula más cerca al prototipo.

Five measurements were carried out for each distance/speed. A benchmark was used to compare loads moving across the pavement structure, which is the average for the maximum vibration amplitude of gravity force applied by each axle when travelling in front of the prototype. That is to say, each vehicle produced two vibration amplitude magnitudes (which were averaged), which were recorded by the sensor when vehicles front axle and rear axle circulated on the pavement structure. The experimental phase was carried out on a flexible pavement structure.

Phase 4. Mathematical model. The results obtained from phase 3, were used to develop an empirical regression equation to calculate the load moving across a pavement structure by employing vibration measured by the prototype. This equation was defined among different equations by using mathematical programs TCWin and techdig.

5. Results

Figures 11-14 show the results obtained from the execution of phase 3, which is described by the Methodology chapter. There is an expected increment of measured amplitude values as long as the vehicle increases load and circulation speed. Additionally, we observe that such amplitude is higher as long as the vehicle is closer to the prototype.



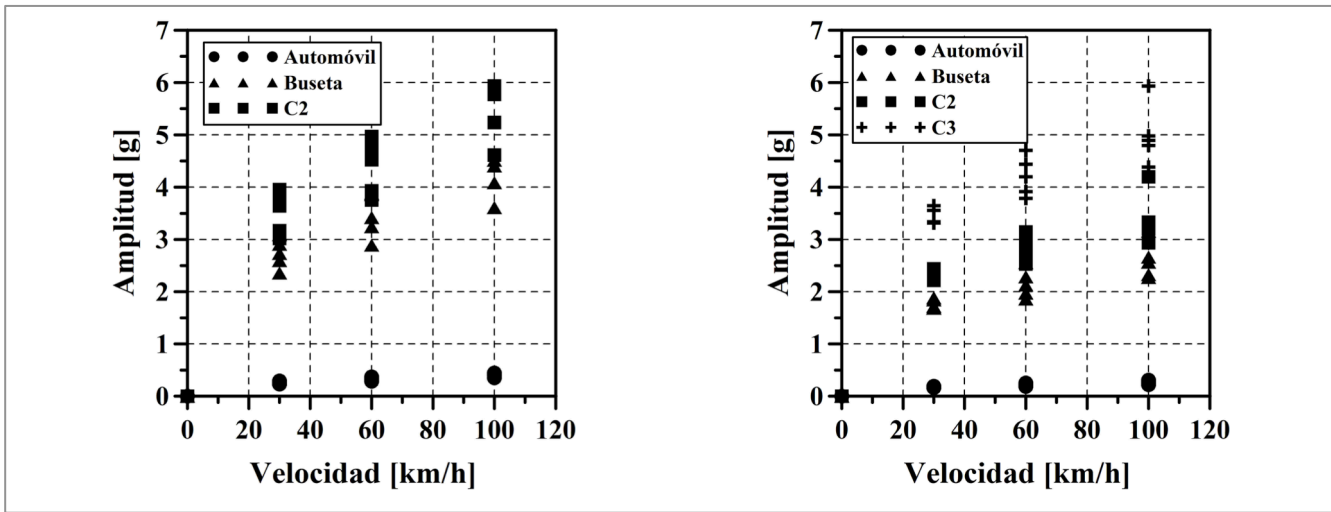


Figura 11. Evolución de la amplitud de la vibración con la velocidad para $D = 30\text{cm}$

Figure 11. Evolution of vibration amplitude due to speed $D = 30\text{cm}$

Figura 12. Evolución de la amplitud de la vibración con la velocidad para $D = 60\text{cm}$

Figure 12. Evolution of vibration amplitude due to speed $D = 60\text{cm}$

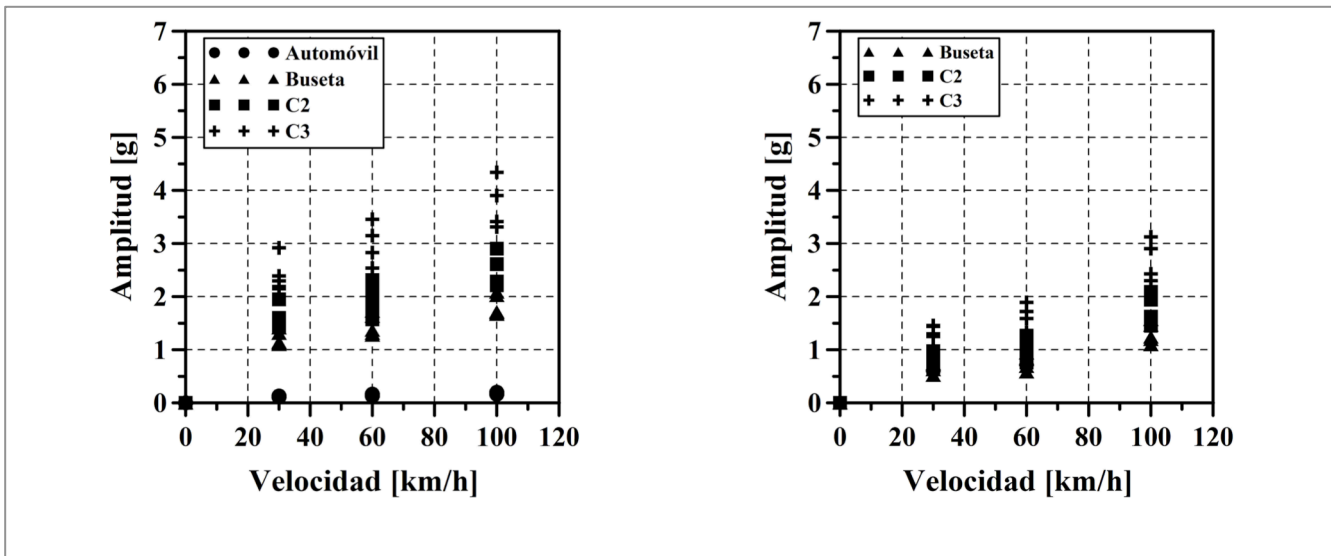


Figura 13. Evolución de la amplitud de la vibración con la velocidad para $D = 100\text{cm}$

Figure 13. Evolution of vibration amplitude due to speed $D = 100\text{cm}$

Figura 14. Evolución de la amplitud de la vibración con la velocidad para $D = 150\text{cm}$

Figure 14. Evolution of vibration amplitude due to speed $D = 150\text{cm}$

En la Figura 11 no aparecen los resultados de los camiones C3 porque la magnitud de la amplitud es superior a 6g y el rango del sensor oscila entre 0.1g y 6g. De manera similar en la Figura 14 no se presentan resultados de amplitud de vibración para el caso en el cual circuló el Automóvil debido a que la señal de amplitud de vibración era muy pequeña (inferior a 0.1g). Lo anterior indica que el sensor del prototipo es capaz de medir la amplitud de vibración de vehículos circulando a velocidades entre 30 y 100 km/h por el pavimento flexible, con una masa aproximada entre 10 y 17 toneladas, y situados a una distancia entre 30 cm y 1.5 m.

The results for C3 trucks are not presented by Figure 11, because the amplitude magnitude is higher than 6g, and the sensor range oscillates between 0.1g and 0.6g only. Similarly, Figure 14 does not present the vibration amplitude results obtained for the car, since its vibration amplitude was too low (lower than 0.1g). Above indicates that the prototype is capable of measuring vibration amplitudes from vehicles travelling on the flexible pavement structure at speeds between 10 and 17 tons, at distances between 30 cm and 1.5 m.



La señal de amplitud de vibración con mejor grado de repetitividad y menor desviación fue aquella que se obtuvo cuando los vehículos circularon con una masa de 10 y 17 toneladas, a 30 cm de distancia del prototipo y a una velocidad de 100 km/h (distancia más cercana y mayor velocidad). A 60, 100 y 150 cm de distancia del prototipo, se reporta una disminución promedio de la amplitud de vibración de 37, 56 y 74% con respecto a aquella obtenida a 30 cm. De la misma forma, dicha amplitud disminuyó en promedio un 37% cuando la velocidad de circulación disminuyó desde 100 km/h hasta 30 km/h.

En las Figuras 15-18 se observa una mejor tendencia de los resultados presentados con anterioridad cuando la amplitud de la vibración se normaliza con la masa del vehículo. Estos datos pueden ser descritos matemáticamente a través de la Ecuación (1).

$$\frac{A}{m} = \exp-(0.63 + 0.012D) \times \sqrt{V} \quad (1)$$

A es la amplitud de la vibración en gravedades (g), m es la masa del vehículo en kg, D es la distancia horizontal entre la llanta más cercana del vehículo con el prototipo en cm y V es la velocidad de circulación del vehículo en km/h. Una simulación de los resultados empleando la Ecuación (1) se presenta en las figuras 15-18. Se observa una buena correlación (coeficiente r^2 entre 0.84 y 0.92) entre los resultados obtenidos y aquellos simulados empleando la Ecuación.

The best achieved vibration amplitude with the best repetition degree and the least deviation degree was the one obtained when vehicles circulated with a mass of 10 and 17 tons, at 30 cm distance from the prototype and at speed of 100 km/h (closer distance and higher speed). At 60, 100 and 150 cm distance from the prototype, an average decrease is reported for the vibration amplitude of 37, 56 and 74% in comparison to the one obtained at 30 cm. Similarly, such amplitude decreased in an average of 37% when circulation speed decreased from 100 km/h down to 30 km/h.

Figures 15-18 show an improved trend of abovementioned results, when the vibration amplitude is normalized due to the vehicle mass. Such results may be mathematically described by means of Equation 1.

A is vibration amplitude in force gravity (g); m is the vehicle mass in kg; D is the horizontal distance in cm between the vehicle wheel rim, which is closest to the prototype and; V is the vehicle circulation speed expressed in km/h. Figures 15-18 present a simulation of results obtained by Equation (1). There is a good correlation (coefficient r^2 between 0.84 and 0.92) between achieved results and those simulated by the Equation 1.



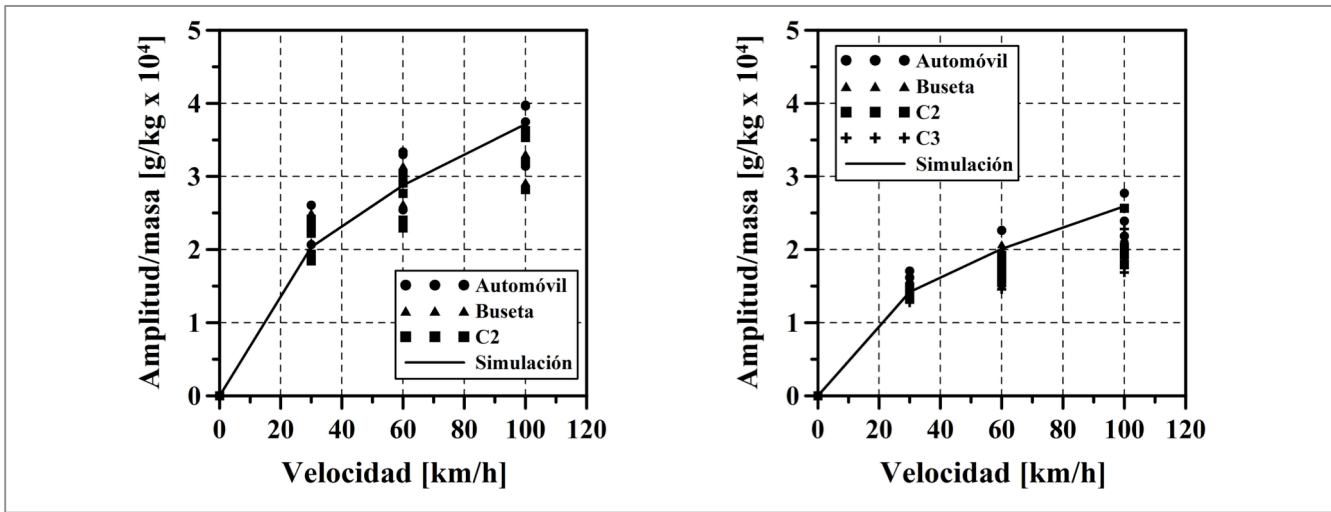


Figura 15. Evolución de la relación entre amplitud de la vibración y la masa del vehículo con la velocidad para $D = 30\text{cm}$

Figure 15. Evolution of the relationship of vibration amplitude with vehicle mass due to speed $D = 30\text{cm}$

Figura 16. Evolución de la relación entre amplitud de la vibración y la masa del vehículo con la velocidad para $D = 60\text{cm}$

Figure 16. Evolution of the relationship of vibration amplitude with vehicle mass due to speed $D = 60\text{cm}$

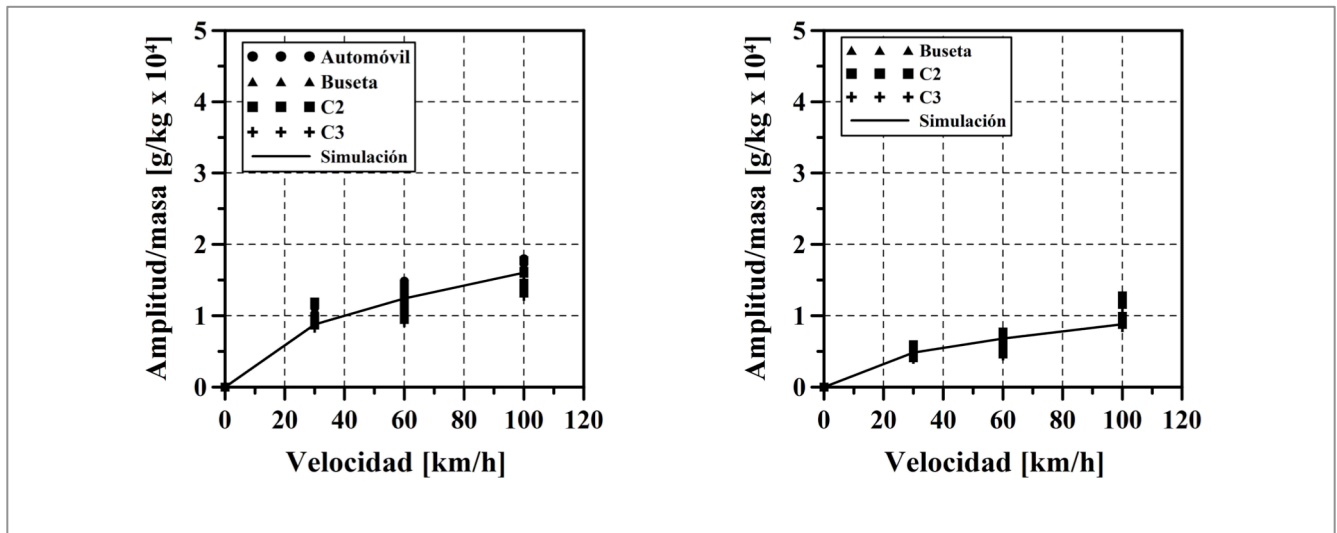


Figura 17. Evolución de la relación entre amplitud de la vibración y la masa del vehículo con la velocidad para $D = 100\text{cm}$

Figure 17. Evolution of the relationship of vibration amplitude with vehicle mass due to speed $D = 100\text{cm}$

Figura 18. Evolución de la relación entre amplitud de la vibración y la masa del vehículo con la velocidad para $D = 150\text{cm}$

Figure 18. Evolution of the relationship of vibration amplitude with vehicle mass due to speed $D = 150\text{cm}$

6. Conclusiones

En el presente estudio, un prototipo electrónico fue diseñado y construido para medir las vibraciones que generan las cargas vehiculares cuando circulan sobre un pavimento flexible. Con base en una fase experimental ejecutada en campo se concluye que, con las vibraciones medidas por el prototipo, se puede estimar la carga vehicular que circula sobre el pavimento cuando ésta se mueve a velocidades entre 30 y 100 km/h, con una masa aproximada entre 10 y 17 toneladas, y situados a una distancia entre 30 cm y 1.5 m.

6. Conclusions

In the present study, an electronic device was designed and built to measure vibrations generated by different vehicular loads moving across a flexible pavement structure. Based on an experimental phase executed on-site, we can conclude that vibrations measured by the prototype can be used to calculate vehicular load moving across the pavement structure when load moves at speeds between 30 and 100 km/h, with an approximated mass between 10 and 17 tons, at distances between 30 cm and 1.5m.



Así mismo, fue desarrollada una ecuación matemática regresional que es capaz de estimar con un grado aceptable de confianza (coeficiente de correlación r^2 entre 0.84 y 0.92), la masa que circula sobre el pavimento flexible ensayado, a través de la amplitud de vibración capturada por el sensor, la velocidad del vehículo en movimiento y la distancia a la cual se encuentre el vehículo del prototipo. Como limitación principal se debe reportar que el prototipo desarrollado es incapaz de estimar cargas estáticas o circulando a muy baja velocidad (inferior a 30 km/h), ya que en esta posición, los vehículos no generan vibración que pueda ser captada por el sensor.

En una futura fase del estudio, la cual se está iniciando actualmente, el sensor del prototipo debe ser perfeccionado con el fin de que pueda medir cargas en movimientos inferiores a 10 toneladas (p.e., Automóviles, Microbuses) y superiores a 17 toneladas (p.e., Tractocamiones, Camiones compuestos por 4 ejes o superiores). Adicionalmente, se debe evaluar la influencia de los siguientes factores (los cuales no fueron tenidos en el presente estudio) sobre las vibraciones medidas por el prototipo: asociados al estado del pavimento (tipo de pavimento, rugosidad superficial, deterioros superficiales, deflexiones, propiedades de los materiales, tipo de subrasante, confinamiento lateral, etc.), asociados al vehículo (velocidad, aceleración, tipo de llanta, magnitud de carga, tipo de suspensión, etc.) y asociados a las condiciones ambientales (precipitación, temperatura, humedad, viento, etc.).

At the same time, a mathematical regression equation was developed. This equation is capable of reliably calculating the mass moving across the analyzed pavement structure (correlation coefficient r^2 between 0.84 and 0.92), by using the vibration amplitude captured by the sensor, as well as the vehicle-in motion speed and the distance between the vehicle and the prototype. The main disadvantage of this prototype is that it is unable of calculating static charges when the circulation speed is lower than 30 km/h, because at this speed vehicles do not generate vibration that can be captured by the sensor.

In a further study phase, which is currently beginning; the prototype shall be improved so as to measure loads-in-motion lower than 10 tons (cars and buses) and higher than 17 tons (truck tractors, 4-axle trucks or higher). Additionally, the influence from the following factors shall be evaluated (which were not included in this study) about vibrations measured by the prototype: pavement serviceability conditions (type of pavement, surface roughness, surface damages, deflections, material properties, sub-grade type, side confinement, etc.); those ones related to the vehicle (speed, acceleration, kind of wheel rim, load magnitude, kind of suspension, etc); and finally those ones related to environmental conditions (rain, temperature, humidity, wind, etc).

7. Referencias/References

- AASHO - American Association of State Highway Officials. (1961)**, The AASHO Road Test, Special Report 61 (7 reports, A-G), National Academy of Sciences - National Research Council, Washington D.C.
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. (1986, 1993)**, Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (1994)**, Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method, ASTM E 1318 - 94.
- Beckett N., Bañez B., Darwin D. (2010)**, Annual Weigh-In-Motion (WiM) Report 2010, NZ Transport Agency (NZTA) Report.
- Benekohal R. F., El-Zohairy Y. M., Wang S. (2000)**, Truck Travel Time Around Weigh Stations: Effects of Weigh in Motion and Automatic Vehicle Identification Systems. Transportation Research Record, 1716, 135-143.
- Bushman R., Pratt A. J. (1998)**, Weigh In Motion Technology - Economics and Performance. Presented at the North American Travel Monitoring Exhibition and Conference, Charlotte NC May 11-15, 1998 NATMEC '98.
- Castellanos A. P., Rojas J. P. (2005)**, Espectros de Carga Vehicular en la Zona Urbana de Bogotá D.C., M. Sc. Thesis, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes (Colombia).
- Cheng L., Zhang H., Li Q. (2007)**, Design of a Capacitive Flexible Weighing Sensor for Vehicle WIM System, Sensors, 7, 1530-1544.
- COST 323 (1999)**, European WIM Specification, August 1999.
- Cropley S. (1996)**, Weigh-In-Motion (WIM) Systems: Use in Pavement Design, In: Proc. Weigh-in-Motion Symposium, May 1996, ARRB Transport Research Ltd.
- Florida Department of Transportation, Transportation Statistics Office. (2007)**, Traffic Monitoring Handbook.
- Gan J.-L., Cai H.-W., Geng J.-X., Pan Z.-Q., Qu R.-H., Fang Z.-J. (2008)**, Optic Fiber-Based Dynamic Pressure Sensor, Journal of Electronic Science and Technology of China, Vol. 6, No. 4, 482-485.
- Garnica P., Correa A. (2004)**, Conceptos Mecanicistas en Pavimentos, Publicación técnica No. 258, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro.
- Haider S. W., Harichandran R. S., Dwaikat M. B. (2012)**, Impact of Systematic Axle Load Measurement Error on Pavement Design Using Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Journal of Transportation Engineering, Vol. 138, No. 3, 331-386.
- Jacob B., de La Beaumelle V. F. (2010)**, Improving Truck Safety: Potential of Weigh-In-Motion Technology, IATSS, Research 34, 9-15.
- Kantor P., Pérsico D. (2005)**, Estudio de Vibraciones en Edificios, Ingeniería Estructural, Buenos Aires, No. 33.
- Liu R., Chen X., Li J., Guo L., Yu J. (2006)**, Evaluating Innovative Sensors and Techniques for Measuring Traffic Loads. Report 0-4509-1, Project Number: 0-4509, Subsurface Sensing Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Houston.
- Lu Q., Zhang Y., Harvey J. (2009)**, Growth of Truck Traffic Volume for Mechanistic-Empirical Pavement Design, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, No. 3, 161-172.
- Martin P. T., Feng Y., Wang X. (2003)**, Detector Technology Evaluation, MPC-03-154, the Mountain-Plains Consortium (MPC), November 2003.
- MEPDG. ARA, Inc., ERES Consultants Division (2004)**, Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, Washington, D.C., www.trb.org/mepdg/. Accessed September 12 of 2007.



- Nassiria S., Bayata A., Kilburn P. (2013)**, Traffic Inputs for Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Using Weigh-In-Motion Systems in Alberta, International Journal of Pavement Engineering (Accepted to Publish in 2013).
- Nikolaidis D. R. (2002)**, Real-Time Speed, Classification, and Weigh-In-Motion Using a Single, Spatially Distributed Fiber-Optic Sensor, A dissertation of Florida Institute of Technology.
- Federal Highway Administration. (2001)**, Truck Weight Monitoring. May 1, 2001, <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tmguidetmg5.htm>.
- Peters B., Koniditsiotis Ch. (2000)**, Weigh-In-Motion Technology, Austroads Project No. RUM.TM.9, Austroads Publication No. AP-R168/00.
- Prozzi J. A., Hong F. (2007)**, Effect of Weigh-in-Motion System Measurement Errors on Load-Pavement Impact Estimation, Journal of Transportation Engineering, Vol. 133, No. 1, 1-10.
- Prozzi J. A., Hong F. (2007a)**, Optimum Statistical Characterization of Axle Load Spectra Based on Load-Associated Pavement Damage, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 4, 323-330.
- Prozzi J., Hong F., Leung A. (2008)**, Effect of Traffic Load Measurement Bias on Pavement Life Prediction: A Mechanistic-Empirical Perspective, Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board, 2087, 91-98.
- Teral S. R. (1998)**, Fiber Optic Weigh-In-Motion: Looking Back and Ahead, Proc. Optical Engineering, Vol. 3326, 129-137.
- Wang K. (2005)**, A Fiber-Optic Weigh-In-Motion System Based on Fiber Bragg Grating Technologies, A Dissertation of Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, USA.
- Wang K. C. P., Li Q., Hall K. D., Nguyen V., Xiao D. X. (2011)**, Development of Truck Loading Groups for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, No. 12, 855-862.
- Whitford R. K. (1998)**, Truck Weight Monitoring Plan Using Weigh-In-Motion Devices: Plan for WIM for the State of Alaska, Presented at the North American Travel Monitoring Exhibition and Conference, Charlotte NC May 11-15, 1998 NATMEC '98.
- Yannis G., Antoniou C. (2005)**, Integration of Weigh-in-Motion Technologies in Road Infrastructure Management, ITE Journal, Vol. 75, No. 1, 39-43.
- Zhang W., Suo Ch., Wang Q. (2008)**, A Novel Sensor System for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways, Sensors, 8, 7671-7689.

