



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA DETERMINAR EL PESO DE VEHÍCULOS LIGEROS EN MOVIMIENTO

**José Ricardo Hernández Jiménez
Manuel de Jesús Fabela Gallegos**

**Publicación Técnica No. 247
Sanfandila, Qro. 2004**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Diseño y construcción de un
prototipo para determinar el peso de
vehículos ligeros en movimiento**

**Publicación Técnica No. 247
Sanfandila, Qro. 2004**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M. C. José Ricardo Hernández Jiménez y el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, investigadores de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se agradecen los comentarios y sugerencias del M. C. David Vázquez Vega y del Dr. Miguel Martínez Madrid, investigador y coordinador, respectivamente, de la misma Coordinación.

Para su elaboración se tomó como base el documento “Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento”, presentado en 2003 por el Ing. José Ricardo Hernández Jiménez como Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, en el Instituto Tecnológico de Querétaro.

Índice

	Página
Resumen	V
Abstract	VII
Resumen ejecutivo	IX
Introducción	1
1 Antecedentes	5
1.1 Desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico	5
1.2 Alcances con los sistemas de pesaje dinámico	9
1.3 Estandarización del pesaje en movimiento	11
1.4 El pesaje de vehículos en México	12
1.5 Objetivo y alcances	12
2 Criterios en la evaluación dinámica del peso	15
2.1 Estandarización del pesaje dinámico	15
2.2. Clasificación de los sistemas de pesaje	16
2.3 Requerimientos de repetibilidad y funcionalidad	18
2.4 Requerimientos para la operación del sistema de pesaje	18
2.5 Reglamentos sobre Pesos y Dimensiones en México	19
3 Principios aplicados al pesaje dinámico	21
3.1 Técnicas de medición	21
3.1.1 Medición con base en la deformación y la resistencia eléctrica.....	21
3.1.2. Medición con base en la presión hidráulica	22
3.1.3. Medición con base en carga y voltaje eléctricos	23
3.2 Extensometría	23
3.2.1. La resistencia eléctrica como indicador de deformación.....	23
3.2.2. Conversión de resistencia a voltaje	24
4 Desarrollo de un prototipo de pesaje dinámico	29
4.1 Descripción	29
4.1.1 Aspectos generales	29
4.1.2 Consideraciones de diseño	30

	Página
4.2. Diseño preliminar	31
4.2.1 La deformación como transductor de fuerza	31
4.2.2 Prototipo preliminar	32
4.3 Prototipo de prueba	36
4.3.1 Fabricación	36
4.3.2 Instrumentación práctica	37
4.3.3 Colocación en sitio de prueba	41
5 Pruebas del prototipo	43
5.1 Preparación de equipo	43
5.2 Consideraciones generales para pruebas dinámicas	44
5.3 Pruebas estáticas	46
5.3.1 Preparación de la carga	46
5.3.2 Calibración	47
5.4 Pruebas dinámicas	49
5.4.1 Vehículos de prueba	49
5.4.2 Zona de prueba	52
5.4.3 Ejecución de pruebas	52
5.5 Resultados de pruebas	53
5.5.1 Resultados principales	53
5.5.2 Discusión	56
Conclusiones	59
Referencias	61
Anexos	63

Resumen

Se describe el desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos ligeros desplazándose a bajas velocidades. El diseño se basa en el concepto de flexión de placas en cantilibre y en la aplicación de la técnica de extensometría. Los sensores de deformación, comúnmente conocidos como galgas extensométricas, se disponen en un arreglo denominado puente de Wheatstone. Este arreglo brinda ventajas que se traducen en un mejor manejo de la señal eléctrica producida por cambios en la longitud de las galgas. El trabajo incluye pruebas con un prototipo preliminar simplificado de laboratorio y un prototipo con mayor capacidad de carga y mayor alcance de la instrumentación. Los resultados con el prototipo preliminar mostraron un buen comportamiento estático del diseño y de la instrumentación empleada, validando los principios aplicados. El prototipo final mostró un buen comportamiento en condiciones de pesaje estático, así como dinámico con vehículos pequeños circulando a velocidades menores a 10 km/h, independiente de la trayectoria del paso de las llantas sobre el dispositivo. Velocidades mayores, así como el paso de vehículos de mayor peso y dimensiones, produjeron un funcionamiento inadecuado del prototipo de pesaje. Lo anterior facilitó identificar aspectos de mejora, tanto en el diseño del dispositivo, como en el acondicionamiento de la zona de prueba, que pueden tomarse en cuenta para trabajos futuros en esta línea de investigación.

Abstract

A prototype to determine weigh-in-motion of light vehicles at low velocities is described in this work. The design is based on the concept of flexion of cantiliver beams and the use of strain gages technique. The strain sensors are prepared in a Wheatstone bridge arrangement taking advantage of the management of electrical signal produced by changes on the gages. A preliminary plate is tested in laboratory to validate the principles applied, whose results showed good mechanical and electrical behavior. A final prototype showed good behavior in static conditions, as well as in dynamic conditions under tests with very light vehicles while traveling at velocities lower than 10 km/h, independently of tires' path on the prototype upper plate. Higher velocities and bigger vehicles produced inadequate performance of the weigh-in-motion mechanical prototype. However, the latter results can be used to improve the design and the test site conditioning, to be considered in future works on this research line.

Resumen ejecutivo

Desde un punto de vista mecánico, la carga aplicada a los pavimentos está directamente relacionada con el peso y las dimensiones de los vehículos que transitan sobre éstos. Mayores niveles de carga conducen a una mayor probabilidad de daños en carreteras y puentes, con la consecuente disminución de la capacidad de carga estructural. Además de lo anterior, el incremento en carga lleva consigo un efecto considerable en el comportamiento dinámico del vehículo que repercuten sobre su estabilidad.

Debido a la creciente necesidad de movimiento de productos de un lugar a otro, se ha demandado cada vez una mayor capacidad de carga de los vehículos pesados. La importancia de establecer y controlar su peso se deriva, entre otros aspectos, del efecto que éste tiene sobre el deterioro de los pavimentos y los niveles de seguridad de las carreteras. Aunque en México se cuenta con reglamentos que regulan el peso de los vehículos de autotransporte, su aplicación requiere determinar el peso bruto combinado del vehículo y su distribución sobre los ejes, bajo condiciones de operación normales. Sin embargo, en la actualidad la determinación del peso se lleva a cabo colocando el vehículo y manteniéndolo inmóvil sobre la plataforma de una báscula. Dada la magnitud del tránsito en carreteras importantes, las maniobras y el tiempo requeridos en la medición estática del peso, afecta tanto al tránsito mismo como a los destinatarios de los productos transportados.

Una alternativa para determinar el peso de los vehículos con un mínimo de alteración de sus condiciones normales de operación, es hacerlo cuando éstos se encuentre en movimiento. Las estimaciones obtenidas por este medio dan lugar para controlar tanto el peso bruto vehicular como el peso soportado por cada uno de los grupos de ejes. En el diseño de dispositivos de pesaje dinámico se han aplicado mecanismos que sufren un cambio cuantificable en sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas u ópticas, entre otras, cuando son sometidos a una sollicitación mecánica.

En este trabajo se describe el desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos ligeros desplazándose a bajas velocidades. El diseño se basa en el concepto de flexión mecánica y en la aplicación de la técnica de extensometría. El prototipo representa un dispositivo mecánico, cuya capacidad de carga nominal es la equivalente a la soportada por una llanta en el extremo de cada eje en un vehículo de 12 kN de peso. El dispositivo se fundamenta en la flexión de dos placas en voladizo (un extremo apoyado y el opuesto sin apoyo) las cuales soportan la carga transmitida por el paso del vehículo. La flexión de las placas es transmitida a los sensores de deformación (galgas extensométricas) dispuestos en un arreglo denominado puente de Wheatstone, que traduce la deformación en una señal de tensión eléctrica.

Como parte del proceso de pruebas, se evalúa preliminarmente en laboratorio una placa con un arreglo inicial y posteriormente el prototipo con mayor capacidad de carga e instrumentación. Los resultados iniciales de laboratorio mostraron un buen comportamiento estático del diseño y de la instrumentación empleada, validando los principios aplicados. El prototipo final presentó un excelente comportamiento en condiciones de pesaje estático y aceptable en pruebas dinámicas con vehículos pequeños desplazándose a velocidades menores a 10 km/h e independientemente de la trayectoria del paso de las llantas sobre el dispositivo, con desviaciones menores al 10%. Sin embargo, velocidades mayores, así como el paso de vehículos de mayor peso y dimensiones, produjeron un funcionamiento inadecuado del prototipo de pesaje, principalmente debido a las dimensiones y al acondicionamiento del área de prueba. Lo anterior permitió identificar aspectos de mejora, tanto en el diseño del dispositivo, como en el acondicionamiento de la zona de prueba, que pueden tomarse en cuenta en trabajos futuros sobre esta línea de investigación.

Los resultados demuestran que el dispositivo es de utilidad para la realización de un pesaje estático y para un pesaje dinámico a baja velocidad. Sin embargo, es menester trabajar sobre los detalles detectados durante la evolución del estudio a fin de obtener dispositivos con mayor capacidad y mejor desempeño práctico.

Introducción

Desde un punto de vista mecánico, la carga aplicada a los pavimentos está directamente relacionada con el peso y las dimensiones de los vehículos que transitan sobre éstos. Esta carga se traduce como una distribución de esfuerzos que, conjugados con las condiciones estructurales de las diversas capas de la carretera, provocan un estado de desgaste o deterioro del pavimento, con la consecuente disminución de la capacidad de carga de la estructura y de la reducción de los niveles de seguridad y comodidad en el manejo.

Mayores niveles de carga conducen a una mayor probabilidad de daños en carreteras y puentes. Además de lo anterior, el incremento en carga lleva consigo un efecto considerable en el comportamiento dinámico del vehículo, que conjugado con las condiciones superficiales de la carretera, repercuten sobre su estabilidad [1].

Debido a la creciente necesidad de movimiento de productos de un lugar a otro, se ha demandado cada vez una mayor capacidad de carga de los vehículos pesados. La importancia de establecer y controlar el peso de los vehículos se deriva, entre otros aspectos, del efecto que éste tiene sobre el deterioro de los pavimentos y los niveles de seguridad de las carreteras.

Estudios recientes llevados a cabo en diez estaciones en México [2], reportan que aproximadamente un 30% de vehículos (de un mismo tipo) operan con mayores cargas por eje que el nivel recomendado, sobrepasando algunos vehículos en casi un 100% los límites de carga permisibles. Por esta razón, se han realizado importantes esfuerzos para verificar el peso de los vehículos, con el propósito de estimar el daño producido a la infraestructura y regular los excesos de dimensiones en el tránsito. Ante esta situación, se está instrumentando una regulación y un control más estrictos de la carga máxima por eje [3].

Aunque en México se cuenta con reglamentos que norman el peso de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal [3], su aplicación requiere determinar el peso bruto combinado y su distribución sobre los ejes, bajo condiciones de operación normales. Realizar un pesaje estático implica colocar el vehículo y mantenerlo inmóvil sobre la plataforma de una báscula, mientras se mide su peso y sus dimensiones globales, lo cual es una labor extenuante en la que se invierte un tiempo relativamente largo. Además es necesario realizar mediciones y cálculos adicionales para determinar la carga soportada por cada eje o conjunto de ejes. Dada la magnitud del tránsito en carreteras importantes, las maniobras involucradas en la medición estática del peso afectaría tanto al tránsito mismo como a los destinatarios de los productos transportados.

Una alternativa para determinar el peso del vehículo con un mínimo de alteración en sus condiciones normales de operación, es hacerlo dinámicamente; es decir,

estimar el peso real con un grado de aproximación aceptable cuando se encuentre en movimiento. De esta manera, se reduce la interferencia con la circulación normal del resto de los vehículos. Las estimaciones obtenidas por este medio dan lugar al control tanto del peso bruto vehicular (peso del vehículo más el de la carga), como del peso soportado por cada grupo de ejes [4]. No obstante, las reglamentaciones vigentes acerca de este peso por eje no han sido suficientemente detalladas como para considerar el peso de cada eje individual en un grupo de ejes. Para ejemplificar este aspecto, en la Figura A se observa una limitación por agrupamientos de ejes y una limitación por ejes individuales dentro de un agrupamiento de ejes.

Se ha reportado que una distribución desigual de la carga por eje en los agrupamientos de ejes, tiene un efecto adicional relativo a la carga estática sobre el deterioro del pavimento, que va desde un 30% hasta un 200% por arriba del peso estático [5, 6].

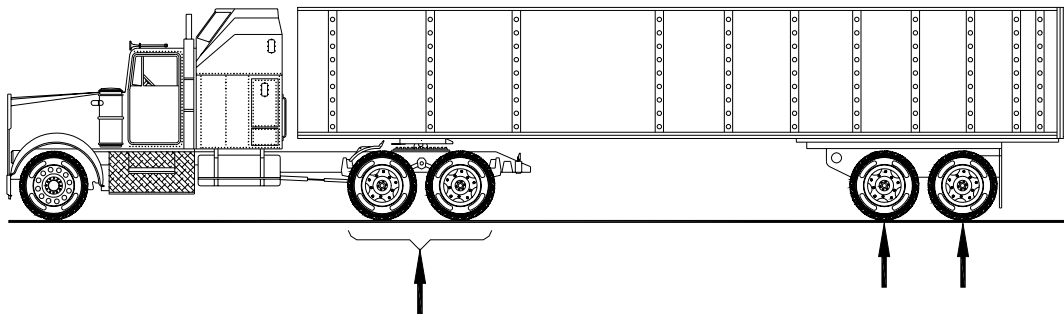


Figura A.

Control del peso por grupos de ejes y por ejes individuales en los grupos de ejes.

El pesaje dinámico se refiere a la acción de estimar el peso bruto del vehículo y la porción del peso que es soportado por cada rueda, eje o grupo de ejes, cuando éste transita a una velocidad determinada sobre la carretera, por medio del análisis de las fuerzas que se presentan a través de las llantas y su contacto con el pavimento. Para realizar esta acción de pesaje es necesario obligar al vehículo a pasar por encima de un dispositivo colocado en su trayectoria [7]. Este dispositivo puede ser utilizado conjuntamente con otros equipos o instrumentos para registrar y almacenar información que permita verificar el cumplimiento de las reglamentaciones.

Un dispositivo de pesaje dinámico permite estimar rápidamente la carga vertical en la llanta o eje de un vehículo mientras permanece en movimiento. La información adquirida a través de estos dispositivos es útil para planear aspectos logísticos, de regulación y operación del transporte, en actividades de mantenimiento, reconstrucción de puentes y carreteras, así como en su diseño. Además, el uso de una pesadora dinámica permite instrumentar programas para establecer impuestos con base en la carga por eje o para programar desvíos de vehículos de

carga pesada de rutas con estructuras sensibles a sufrir daño cuando se rebasan ciertos límites de peso.

El pesaje dinámico representa menor costo de operación que el estático. Aunque su relativa inexactitud es una desventaja de los sistemas de pesaje dinámico comparados con básculas estáticas, pueden proporcionar información para conocer la distribución relativa de la carga sobre los ejes, además de la fuerza que el vehículo es capaz de transmitir al pavimento en condiciones dinámicas.

En algunos países está debidamente reglamentado y controlado el uso de equipos para determinar el peso de los vehículos de manera dinámica en las carreteras. En Estados Unidos, una de las bases para la aplicación de estos dispositivos es la norma ASTM E1318-94 "*Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method*". Dentro de los aspectos relevantes de esta norma está la definición de cuatro tipos de sistemas de pesaje dinámico, clasificados de acuerdo a sus capacidades de medición y tipo de instalación.

En el diseño de dispositivos de pesaje se han aplicado mecanismos que sufren un cambio cuantificable en sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas u ópticas, entre otras, cuando son sometidos a una sollicitación mecánica. Sobresalen principalmente las pesadoras instrumentadas con extensómetros eléctricos, que sufren un cambio de resistencia al ser deformadas, o con materiales piezoeléctricos que alteran su estado de carga eléctrica al ser sujetos a tensión o compresión. Estos principios de operación se han aplicado ampliamente en el desarrollo de transductores. Por ejemplo, en 1973 se inició un proceso de medición sistemática del peso de los vehículos en movimiento en la República Federal Alemana. Después de varios años de manufactura de prototipos y pruebas piloto, se prepararon detectores de carga por eje del tipo hidráulico, mecánico (placa en flexión) y piezocerámico (con base en un cable coaxial).

Actualmente se comercializan en Estados Unidos de América, Canadá y Europa dispositivos de pesaje dinámico para estimar pesos por eje de vehículos pesados, basados en las propiedades piezoeléctricas y capacitivas de algunos materiales. La exactitud de tales dispositivos depende de la velocidad del vehículo y de las condiciones del terreno, ya que es necesario evitar una excitación vibratoria antes de que el vehículo pase sobre el sensor de carga.

Australia ha sido pionera en el uso de extensómetros en sus sistemas de medición dinámica del peso. Con base en estos principios, se han aplicado transductores para detectar cargas en la superficie del pavimento, así como dispositivos para medir el tiempo entre el paso de los ejes individuales.

Aún cuando en otros países se han desarrollado diversos sistemas de pesaje para evaluar las cargas dinámicas, en México no se cuenta con una tecnología propia, aplicada a resolver los problemas relacionados con la evaluación de las cargas transmitidas a los pavimentos. En este contexto, este trabajo corresponde a un

primer acercamiento en el proceso de generación de alternativas a esta situación, enfocado al desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos ligeros cuando se desplazan a bajas velocidades. Con ello, se pretende resaltar los fundamentos para enfatizar la importancia de conocer el efecto del peso de los vehículos, así como su relación con las cargas dinámicas transmitidas, sobre el comportamiento del pavimento y sobre el mismo vehículo. De esta manera, se conforma una base para trabajos futuros tendientes a resolver el problema del control del peso de los vehículos de autotransporte .

El trabajo está organizado de la siguiente manera. El primer capítulo trata principalmente de la historia del pesaje dinámico y su contexto en el país. El segundo, introduce aspectos relacionados con la estandarización de los dispositivos de pesaje dinámico, en el entorno de la posible aplicabilidad en México. El tercero, describe de manera general los principios físicos que pueden ser utilizados en el desarrollo de sistemas y dispositivos para estimar el peso. En el cuarto capítulo se muestran los aspectos sobresalientes en el desarrollo de un prototipo y su instrumentación para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento. El capítulo subsiguiente, el quinto, describe el proceso de pruebas al que se sujeta el dispositivo propuesto, a partir del cual se determinan sus límites operativos. Finalmente, el escrito expone las conclusiones, recomendaciones y observaciones realizadas durante el desarrollo del trabajo.

1 Antecedentes

En este apartado se describen aspectos históricos del desarrollo de los sistemas de pesaje y su normatividad, así como el contexto de desarrollo en México.

1.1 Desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico

La historia del desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico ha mostrado los diversos intentos realizados para conocer el peso de los vehículos, sin recurrir a básculas estáticas. Los dispositivos han variado con respecto a los principios de medición utilizados, a la forma de los instrumentos y a las adaptaciones y adecuaciones de estructuras existentes en las carreteras. Estos desarrollos responden a las necesidades de los respectivos departamentos de transporte para establecer una armonía entre los vehículos y las carreteras y puentes.

Se han concebido proyectos de investigación con el propósito de generar información sobre la magnitud y tipo de cargas aplicadas sobre el pavimento. Por ejemplo, en la República Federal Alemana se inició un proceso sistemático de pesaje de vehículos en movimiento, desarrollado en 1973 como parte de investigaciones referentes a la construcción de carreteras. El proyecto "*Long-Term Observations at Selected Road Sections*", llevado a cabo por el *Federal Highway Research Institute* (FHRI) desde 1967 hasta 1989, intentó desarrollar un método para realizar el pesaje de los vehículos de carga. Este método se basó en resultados obtenidos en pruebas realizadas en Estados Unidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), con objeto de extender su aplicación a Alemania. Primeramente, se enfocó la atención en conocer todas las influencias externas sobre el pavimento, incluyendo el conocimiento exacto de la carga real debida al tránsito [8]. Acorde con este propósito, se pretendió que los sistemas de pesaje desarrollados por el FHRI fueran capaces de medir las cargas en los ejes de los vehículos al circular a velocidades normales en carretera; es decir, hasta 120 km/h. Después de varios años de manufactura y prueba de prototipos, se prepararon tres diferentes detectores de carga por eje, que entraron en producción en los años setenta. Estos dispositivos consistieron en pesadoras hidráulicas, en pesadoras con base en una placa sujeta a flexión y en el uso de un cable coaxial piezocerámico.

La contribución de estos sistemas fue muy diversa. La instalación para las pesadoras hidráulicas (se usaron cerca de 30 dispositivos) requirió de un cimiento muy costoso, a una profundidad de 90 cm que en ocasiones alcanzaba zonas de la estructura con variaciones en la rigidez, produciendo alteraciones en las lecturas. Aunado a estas perturbaciones, la viscosidad del aceite hidráulico, que variaba con la temperatura, condujo a errores continuos en mediciones realizadas a altas temperaturas, mostrando además poca sensibilidad en temperaturas bajas, influyendo sobre los pesos indicados por el dispositivo. Conforme con estos resultados, este tipo de dispositivo no fue recomendado, pues presentó un comportamiento variable para un intervalo de temperatura de 5°C a 20°C [8].

Para el caso de sistemas de pesaje del tipo de placa en flexión, que consistía en una placa instrumentada con elementos sensibles a la deformación (extensómetros), soportada por dos apoyos extremos, los resultados de pruebas de los cerca de 70 dispositivos instalados mostraron que fueron los detectores de peso más exactos y confiables [8]. Algunas de las ventajas observadas fueron la relativa poca profundidad para su instalación y operación (de 4 a 8 cm), la independencia de las lecturas con la temperatura y la dependencia lineal del voltaje con la carga aplicada. Además de lo anterior, mostraron una aceptable capacidad de carga asociada a la resistencia y rigidez de sus elementos. Sin embargo, su uso requirió de una preparación del sitio de colocación que facilitara la adaptación óptima de los elementos de pesaje a la superficie de la carretera. Esta condición se derivó de la necesidad de minimizar la ocurrencia de fuerzas dinámicas adicionales, como es el caso de las perturbaciones ocasionadas por irregularidades en la superficie del pavimento previo al paso del vehículo sobre el dispositivo de pesaje.

En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de un sistema de placa en flexión.

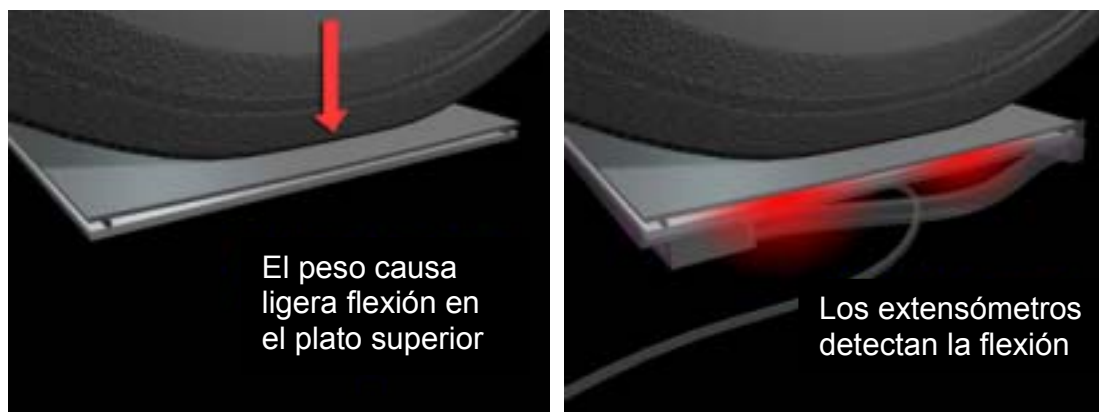


Figura 1.1
Ejemplo de un sistema de pesaje dinámico con placa en dos apoyos, [8].

Durante el uso de estos dispositivos con placas instrumentadas con extensómetros hubo poca ocurrencia de fallas, raramente reportadas. Sin embargo, la estrategia para resolver este tipo de situaciones fue la de reemplazar con una placa nueva instrumentada de la misma manera, aquella que contenía los extensómetros. Este reemplazo implicaba una operación relativamente rápida, estimándose de 2 a 3 h.

Para probar otras alternativas de medición del peso, se instalaron 45 equipos que empleaban un cable coaxial piezoeléctrico, [8]. Desde el inicio de la investigación, los dispositivos con cable coaxial piezoeléctrico se utilizaron sólo para identificar los ejes de vehículos de carga de los de pasajeros, limitados por la dependencia de su comportamiento con la temperatura. Esto fue evidente debido a que los dispositivos que funcionaban perfectamente bien durante la mañana, presentaban un comportamiento completamente fuera de ajuste después de pocas horas de exposición a los rayos del sol. También se observó que las vibraciones del

vehículo debidas a irregularidades del camino, conducían a señales adicionales no deseadas.

Identificadas las ventajas sobresalientes con el uso de medidores de deformación en dispositivos de medición del peso, se buscaron otras formas de aplicación de extensómetros que pudieran aplicarse para el mismo fin. Australia ha sido pionero en el uso de este tipo de sensores en sus sistemas de monitoreo. El departamento de caminos desarrolló un sistema llamado AXWAY que se utilizaría bajo la estructura de un puente, basado en el uso de extensómetros. La experiencia que tomaron con este diseño los llevó a desarrollar el sistema llamado CULWAY, en donde los extensómetros fueron colocados en el techo de una alcantarilla. De esta manera, el peso era registrado midiendo el voltaje producido al doblarse la placa de la alcantarilla, causada por la carga del eje al pasar por encima. Esta señal era medida y registrada por un sistema de adquisición de datos portátil, al momento en que el vehículo pasaba.

El sistema CULWAY usa las alcantarillas de concreto existentes en la carretera, pudiendo prepararse para registrar hasta cuatro carriles de tráfico, cuya instalación y acondicionamiento representa un bajo costo. La repetibilidad del sistema es tal, que los registros del 95% de los vehículos pesados estuvieron dentro del 10 % de su peso estático [9]. Se menciona que se instalaron 120 de estos sistemas en 1986 y, conforme a los resultados obtenidos de estas aplicaciones, otros países adoptaron este tipo de técnicas de medición, como es el caso de China, Malasia y Nueva Zelanda.

Además de los sensores para determinar el peso, en este sistema se usaron detectores en la superficie del pavimento para iniciar la operación de pesaje, para clasificar los vehículos y para establecer el tiempo de paso de los ejes de forma individual. El sistema requirió del empleo de una computadora personal (PC) para guardar los datos, teniendo la posibilidad de conectarse a un dispositivo para permitir un acceso remoto. En 1986 se instalaron en total 139 sistemas de básculas.

El desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico permitió realizar estudios sobre la respuesta en puentes ocasionada por el peso de vehículos en movimiento. Reconociendo la limitante del éxito en el pesaje de vehículos mediante sistemas sobre pavimento, la FHWA efectuó una serie de estudios de factibilidad para recomendar algunas alternativas en sistemas de pesaje en movimiento aplicadas a puentes. De estos estudios se propuso el uso de extensómetros sobre alcantarillas en puentes en la dirección longitudinal para pesar vehículos pesados en movimiento, lo cual fue adoptado por la FHWA para efectuar su implementación, [12].

El sistema de pesaje estaba formado con los siguientes componentes:

- Dos cintas tipo interruptor, colocadas en el carril derecho (carril 1) próximas al espacio de pesaje.

- Un panel opcional, usado con un disparador y una salida de datos, para detectar el tipo de vehículo y el carril por el que transita. El panel no era utilizado cuando el sistema recibía datos de manera automática.
- Transductores fijados en el fondo de una alcantarilla, con pequeños extensómetros colocados en cuatro puntos de concentraciones de esfuerzos de un aro de aluminio, conformando el transductor. Los extensómetros fueron dispuestos en un arreglo de puente de Wheatstone. La longitud del medidor de deformación era de 7,62 cm (3 pulgadas).
- Un vehículo con el equipo de control de la instrumentación, que se colocaba debajo del puente.

Otro de los líderes en el desarrollo de pesadoras dinámicas es *Golden River*, que en 1990 integró un sistema de colección de datos del peso de los vehículos pesados, propiciando un avance significativo en la tecnología del peso en movimiento. El sistema mide y guarda la carga dinámica del vehículo viajando a baja o alta velocidad, [13], cuyos cuatro componentes principales son:

- 1) Los sensores de pesaje
- 2) Lazos inductivos
- 3) Sistema de manejo de datos de tráfico
- 4) Computadora personal y paquete de cómputo para manejo remoto, colección de datos y operaciones de análisis

En 1993, el *Transport Research Laboratory* del Departamento de Transporte en Crowthorne, Berkshire, Inglaterra, probó un sistema de pesaje en movimiento con múltiples sensores. Estas pesadoras dinámicas medían instantáneamente el peso del eje de un vehículo viajando a velocidad normal en una carretera. El peso bruto o peso por eje se estimó promediando el valor suministrado por los sensores. El uso de sólo dos sensores mostró una exactitud y una confiabilidad no satisfactorias, por lo que posteriormente se aplicaron sensores múltiples de pesaje en movimiento y, de este modo, promediar más pesos instantáneos de ejes, tendiendo así a mejorar la exactitud de los sistemas. Por un periodo de siete meses, en la autopista A34 de Abingdon se instaló un arreglo de ocho sensores con acceso a este sistema. El sistema probó que un 93 % de los vehículos fueron pesados dentro del 10% de su verdadero peso bruto estático [14].

Ha habido cierta disponibilidad de sensores para medir fuerzas dinámicas. Los primeros diseñadores, tales como ULR *Weighscale*, usaron placas largas de metal que soportaban la carga completa de una llanta. Los pesos de la llanta instantánea eran normalmente medidos usando extensómetros o celdas de carga aseguradas a las placas, [12]. Recientemente se han diseñado sistemas formados por ranuras estrechas combinadas con sensores, en las que solamente una pequeña parte de la carga está sobre el sensor, siendo usualmente su salida en cualquier instante integrada con respecto a distancias largas. Comparado con los primeros diseños, estos sensores son menos costosos, de más fácil instalación y causan menos problemas al perfil del pavimento.

Las pesadoras para el pesaje eje por eje proporcionan información sobre la carga individual de cada uno de los ejes directamente; mediante cálculo proporcionan información sobre el peso de los ejes dúplex y tridem, sobre el peso del tractor, de cada uno de los remolques y del peso total de la unidad. La diferencia entre las configuraciones "portátil" y "empotrada" consiste en el camino de rodamiento que necesita la primera para mantener la carga al mismo nivel. Se considera báscula "portátil" la que puede instalarse en cualquier superficie horizontal. Este tipo de báscula necesita disponer de un camino horizontal uniforme para mantener la carga al mismo nivel; de otra manera, el resultado de la medición con una carga inclinada sería erróneo, independientemente de la precisión de la báscula.

Existen varias empresas que comercializan dispositivos de pesaje dinámico para vehículos pesados utilizando principios de extensometría o tecnologías capacitivas o piezoeléctricas. Esos dispositivos toman ventaja del avance tecnológico que ha existido en los últimos años, tanto para la construcción de los sensores en la instrumentación, como para la adquisición y manejo de datos. Muchas de las empresas que construyen sistemas de pesaje dinámico son aquellas que fueron ganando experiencia con los años.

Cotizaciones recientes muestran que el precio aproximado de un sistema de pesaje dinámico a baja velocidad (20 km/h) es de alrededor de los 30000 USD. Considerando que los sistemas para pesaje dinámico a alta velocidad son más costosos, es posible que el precio para estos últimos se duplique.

1.2 Alcances con los sistemas de pesaje dinámico

Antes de iniciar la fabricación de cualquier nuevo diseño, se recomienda conocer la información básica sobre la exactitud de las básculas dinámicas para iniciar su desarrollo, ya que es imposible comparar "peso en movimiento" con "peso estático". La exactitud de pesaje debe, por tanto, ser evaluada en una forma diferente en los dos casos, [10].

Además de la carga transmitida al pavimento por el peso de los vehículos, se debe considerar el efecto de su comportamiento dinámico en el peso estimado. A las características de vibración por la interacción de sus componentes y sus propiedades, como llantas, suspensión, chasis, etc., debe agregarse el efecto de la configuración o combinación de diversas unidades (camiones, camiones con caja, ó vehículos articulados), así como las diferencias en la manera de conducir (aceleración, frenado) y efectos ambientales (fuerzas del viento, turbulencias, elevación, lado del viento en relación al vehículo, principalmente). La desviación en la medición de un eje puede variar significativamente en comparación con el peso estático, hasta más del 20 % si para el mismo eje la medición es hecha al formar parte de otro tipo de configuración con otro comportamiento de vibración. Por ejemplo, la variación en toneladas para un vehículo con peso estático de 262221 N, que pasó nueve veces sobre un dispositivo de pesaje dinámico, sacando el peso máximo y el peso mínimo registrado durante cada evento se obtuvo un peso promedio de 270167 N; mientras que al realizar otras pruebas en

otro dispositivo pero con el mismo vehículo el peso promedio fue de 257218 N, menor al registrado con el primer dispositivo, [11].

Algunos de los requerimientos principales que se busca tener en las básculas dinámicas en general son sólo una porción de los datos que se pueden obtener de las operaciones de pesaje estático, pero cuyos alcances pueden ser extendidos al usar pesadoras dinámicas. Uno de los estudios realizados para la *Federal Highway Administration* (FHWA, EU) para detectar el peso de los camiones, proporciona un excelente ejemplo de este hecho. A continuación se muestra el tipo de registros que se obtuvieron en ese estudio.

- Estado
- Sistema de la carretera
- Número de identificación de la estación
- Dirección del viaje
- Fecha
- Horas de operación
- Tipo de vehículo
- Tipo del cuerpo
- Tipo de motor
- Grueso del código de grupo de peso registrado
- Peso registrado
- Bases del registro
- Año del modelo del tractor
- Clase de operación
- Comodidad
- Condición cargado o descargado
- Peso total del tractor o combinación
- Pesos del eje
- Base de la llanta total.

Un pesaje dinámico tiene una gran reducción en el costo. El costo del pesaje de un camión es generalmente mucho menor al aplicar el pesaje en movimiento que el estático. Como un resultado, es fácil obtener datos del pesaje que estén disponibles para todos los usuarios, mejorando la exactitud estática de todos los diferentes procedimientos de estimación que usan la información.

Una de las mayores desventajas de los sistemas de pesaje dinámico es su relativa inexactitud en comparación con básculas estáticas. La mayor parte de los

sistemas de pesaje dinámico trabaja como pesadores de carga por llanta. De acuerdo con el *National Institute of Standards and Technology* (NIST), para los pesadores de carga por llanta se requiere que tengan una exactitud y repetibilidad de $\pm 1\%$ cuando es probado para certificación y debe ser mantenido de allí en adelante al $\pm 2\%$. Pero la naturaleza del pesaje dinámico sugiere que esto será muy difícil de lograr, [11].

1.3 Estandarización del pesaje en movimiento

Es necesario hacer énfasis especial en que es necesario contar con un lenguaje técnico y glosario comunes para el desarrollo de sistemas de pesaje en movimiento. De esta manera, los usuarios potenciales de estos sistemas deben definir la aplicación para la cual quieren obtener datos, desarrollar un inventario de necesidades para el sistema para almacenar datos (cantidades a ser medidas, exactitud requerida, entre otras) y finalmente especificar el equipo, sitio, instalación y procedimientos de operación.

Ante la necesidad de tener especificaciones de la exactitud y repetibilidad, por una parte la norma ASTM E1813 contempla las correspondientes a pesadoras dinámicas, aunque también existen recomendaciones francesas, las cuales consideran la instalación de sensores piezoeléctricos, la opción de sitios y la aceptación de estaciones de pesaje [10]. Los documentos franceses y de Estados Unidos distinguen cuatro aplicaciones principales de sistemas de pesaje y las exactitudes correspondientes a cada una de ellas. Estas son:

- 1) Colección de datos de tráfico/indicación del peso: se observa que el 95 % de las cargas en el eje están en el alcance del 20 al 30% de su peso estático.
- 2) Pesos para la prioridad del mantenimiento del camino entre el 20 y 30% de su peso estático.
- 3) Información del peso detallado/identificar violaciones del límite de carga: 15% de la carga estática.
- 4) Para hacer cumplir los reglamentos de pesos, el intervalo es del 5 al 10% del peso estático.

Cualquier especificación de una pesadora dinámica debe hacerse en dos partes. La primera describe el desempeño del sistema en circunstancias ideales, en donde el vehículo no debe de estar balanceándose debido a la vibración provocada por el perfil o bien por otro proceso de transferencia de carga. La segunda se refiere a factores dependientes del sitio para una instrumentación ideal.

Se sugiere contar con un lugar de prueba tan bueno como sea posible, ya que esto podría ser usado para comparar sistemas de pesaje dinámico futuros y, de esta forma, considerar el que subsecuentes instalaciones de sistemas en otros sitios sean construidas con las mismas características del lugar de prueba, para así lograr el mismo desempeño. Las recomendaciones de las normas sobre

sistemas de pesaje definen los requerimientos de pendiente y radios de curva del sitio, entre otros, por lo que es importante tomarlos en cuenta para el desarrollo de nuevos sistemas de pesaje.

De esta forma la estandarización provee una referencia para comparar los diversos sistemas existentes o los que surjan con el uso de nuevas tecnologías. En el futuro es probable que se mantenga una alta exactitud con sistemas de fibra óptica y otros para medir la posición y ancho de la llanta.

1.4 El pesaje de vehículos en México

Aun cuando en otros países se han desarrollado diversos sistemas de pesaje para evaluar las cargas dinámicas, en México no se cuenta con una tecnología propia, aplicada a resolver los problemas relacionados con la evaluación de las cargas transmitidas por los vehículos a los pavimentos.

Desde hace más de 50 años se ha tenido la necesidad de evaluar el peso de los vehículos pesados por razones de diseño, mantenimiento y conservación de puentes y carreteras. Los dispositivos usados para determinar el peso han sido principalmente pesadores estáticos, que requieren que los camiones sometidos a pesaje permanezcan inmóviles durante la operación. Los pesajes estáticos pueden hacerse de varias formas: pesando el camión entero en una sola maniobra, o por eje, grupos de ejes o por lados de eje, lo que requiere de maniobras adicionales.

Por esa razón, el pesaje estático se ha reconocido como un método poco eficaz para aplicarse a grandes volúmenes de vehículos. Razones como ésta sustentan la búsqueda de otras alternativas para conocer su peso, lo que permite explorar con técnicas aplicadas a vehículos en movimiento. En esta área se han realizado avances significativos que han llevado a la disponibilidad comercial de algunos dispositivos, los cuales han probado ser efectivos en la medición de cargas de la llanta en movimiento; sin embargo, toda esta tecnología ha sido desarrollada en otros países.

Se puede notar la necesidad de desarrollar una tecnología propia aplicable en los procesos de control de niveles de carga en vehículos pesados. Por ello, es necesario promover proyectos en México que motiven el interés de buscar soluciones a los problemas nacionales.

1.5 Objetivo y alcances

Con base en los antecedentes mencionados sobre el pesaje de vehículos en movimiento, el contexto del transporte en México y la necesidad de realizar investigación que sustente su progreso, se presenta este trabajo. Éste comprende el desarrollo básico de un dispositivo para estimar el peso de vehículos ligeros en movimiento, sin que sea necesario detenerlo por completo.

El objetivo establecido para ello es el siguiente:

Diseñar y construir un prototipo para estimar el valor de la carga aplicada al pavimento por un vehículo ligero en movimiento, con velocidades de hasta 30 km/h.

El desarrollo incluye el diseño y la construcción, así como un esquema de pruebas experimentales para prueba de la instrumentación empleada y las características de operación del dispositivo de pesaje. Las características de diseño se establecen de manera que sea capaz de determinar el peso de un solo lado del vehículo, con el requerimiento principal de que presente una relativa inmunidad a la trayectoria de la llanta sobre el mismo.

Dentro de los requerimientos de diseño se encuentran su aplicabilidad a vehículos con una masa de hasta 1200 kg distribuida en cuatro llantas sencillas, además de proporcionar información para la determinación del peso mientras el vehículo se desplaza a bajas velocidades. Este prototipo pretende conformar una base para trabajos futuros, tendientes a resolver el problema del control del peso de vehículos pesado que transitan por carreteras del país.

2 Criterios en la evaluación dinámica del peso

Los sistemas de pesaje dinámico que se han desarrollado requieren de un sistema de medición para determinar las fuerzas que la llanta transmite al camino cuando el vehículo se encuentra en movimiento. Posteriormente, de acuerdo con los principios de medición empleados, se estima la magnitud de la carga soportada estáticamente por la llanta o llantas.

2.1 Estandarización del pesaje dinámico

La importancia de conocer el peso de los vehículos de manera dinámica, no radica sólo en el hecho de determinar cuál es el peso estático soportado por cada llanta. En algunos casos, el proceso de la determinación del peso con el vehículo en movimiento, proporciona la información necesaria para evaluar el efecto dinámico de las cargas que se están aplicando a la infraestructura del camino. Aunque en México están reglamentados los límites de peso de los vehículos de carga pesada, tanto por eje como el peso bruto vehicular, [3], no existe una norma específica que regule las características y aplicación de los sistemas de pesaje dinámico. Para propósitos de ilustración se menciona la norma ASTM E1318-94 *Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method*, elaborada por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Esta norma describe las especificaciones para los sistemas de pesaje de vehículos en movimiento en carreteras, las características técnicas correspondientes a la obtención y al uso de la información, así como el método de prueba para evaluar dichos sistemas. Contempla, además, la descripción del proceso de medición en condiciones dinámicas, de las fuerzas ejercidas por la llanta y, de esta forma, conocer el peso estático aproximado.

El peso bruto de un vehículo es el peso total de los diversos componentes del mismo. Este peso es transmitido a las llantas y de ahí a la carretera, distribuido por conectores tales como resortes, amortiguadores y uniones. En las carreteras, los sistemas de pesaje dinámico son capaces de estimar el peso bruto del vehículo, así como su proporción por eje. Bajo condiciones específicas, un sistema de pesaje dinámico puede recabar información auxiliar que involucra la velocidad del vehículo, el carril de operación, fecha y hora del pesaje, número y espaciamiento entre ejes y su clasificación (de acuerdo al arreglo de ejes), para cada vehículo. De esta manera, los sistemas de pesaje dinámico generalmente tienen tres aplicaciones:

- 1) Para almacenamiento de datos estadísticos del tránsito
- 2) Para apoyar el cumplimiento de reglamentos
- 3) Para prueba y sustento de sanciones y/o recomendaciones

Las especificaciones y los requerimientos de desempeño de tales sistemas varían conforme al tipo de aplicación.

2.2 Clasificación de los sistemas de pesaje

Con el propósito de mostrar una clasificación de los sistemas de pesaje, se toma de referencia la norma ASTM E1318. Dependiendo de las condiciones de operación y del detalle de la información que se desea obtener durante el proceso de medición, a partir de los grupos de datos indicados en la Tabla 2.1, los sistemas de pesaje dinámico se clasifican como tipo I, tipo II, tipo III y tipo IV. Estos tipos enmarcan de manera específica tipología de instalación, las características de medición, las condiciones de operación, las capacidades físicas y mecánicas de los dispositivos y la organización y el control de la información que se requiere obtener.

Tabla 2.1
Posibles grupos de datos que puede proporcionar un sistema de pesaje de vehículos en movimiento.

	Característica
1	Carga en una llanta
2	Carga en un eje
3	Carga en un grupo de ejes
4	Peso bruto del vehículo
5	Velocidad
6	Espaciamiento entre ejes de centro a centro
7	Clase de vehículo (según arreglo de ejes)
8	Código de identificación del vehículo (placas)
9	Carril y dirección de viaje
10	Fecha y hora del viaje
11	Registro del número secuencial del vehículo
12	Base de las llantas (distancia del eje de adelante hasta el de atrás)
13	Carga en ejes equivalentes sencillos
14	Código de violación de la infracción

Sistema de pesaje de vehículos en movimiento tipo I

Entre las características que enmarcan al sistema de pesaje tipo I, se encuentra su instalación para aplicación en hasta cuatro carriles, en un sitio diseñado expresamente para la colección de datos del tránsito vehicular. El sitio debe tener capacidad para ordenar los vehículos y el sistema debe pesarlos mientras se desplazan a velocidades entre 16 y 113 km/h. Para cada vehículo procesado, el sistema debe registrar la clase de información mostrada en la Tabla 2.1. De esta manera, este tipo de sistemas deben proporcionar información sobre las fuerzas en las llantas y, a partir de ésta, estimar la carga en los ejes.

Este sistema debe permitir establecer alarmas para detectar excesos de carga por llanta, por eje, por grupo de ejes o en el peso bruto de los distintos tipos de vehículos, considerando las diferentes velocidades de paso, de manera que se pueda detectar e indicar cuando haya sospecha de violación de cualquiera de los límites de operación establecidos para un vehículo en particular. También, se requiere contar con la capacidad de desplegar en una pantalla la información

solicitada y de almacenarla en memoria. Estas operaciones no deben interferir con la rapidez de procesamiento de los datos listados en la Tabla 2.1, además de permitir desplegarlos y analizarlos de manera inmediata.

El sistema de medición tipo I debe contar con instrumentos que permitan almacenar permanentemente los datos 1, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 de la Tabla 2.1. Como características opcionales, el sistema puede proporcionar copia de los datos generados, contar y almacenar la cantidad de vehículos que transitan por los carriles (hasta 10 carriles, incluyendo los que no cuenten con sensores para pesaje en movimiento), contar los vehículos por clase y por carril, así como medir su velocidad de viaje y almacenar los datos del tránsito por hora.

Sistema de pesaje de vehículos en movimiento tipo II

El sistema de pesaje tipo II tiene características similares a las del tipo I, excepto que en el tipo II no se requiere proporcionar la característica 1 de la Tabla 2.1 (carga en una llanta).

Sistema de pesaje de vehículos en movimiento tipo III

El tercer tipo de sistema de pesaje dinámico puede instalarse en uno o dos carriles. De manera particular, este sistema se enfoca a la determinación del peso de vehículos bajo sospecha de violación del límite de peso, pudiendo realizar la medición a velocidades de tránsito desde 24 hasta 80 km/h. Para cada vehículo procesado, el sistema debe proporcionar los grupos de datos que se muestran en la Tabla 2.1, exceptuando los puntos 7, 12 y 13; además debe estimar la aceleración del vehículo mientras éste se encuentre sobre los sensores del sistema de pesaje. Opcionalmente, el sistema tipo III debe permitir fijar límites de alarma para las cargas por llanta, eje o grupo de ejes y el peso bruto del vehículo, así como para la velocidad y la aceleración del vehículo.

El sistema tipo III debe proporcionar los medios para que, con objeto de confirmar su peso, los vehículos sospechosos de infringir reglamentos sean dirigidos automáticamente hacia una báscula estática. En este sistema, el manejo de los dispositivos de control de tránsito puede realizarse manualmente.

La información recabada debe estar disponible para obtener copia de los datos, mostrarse en pantalla de manera inmediata y para resguardo permanente. El sistema tipo III no requiere dar información sobre la carga en la llanta, opción 1 en la Tabla 2.1, pero se requiere que tenga la alternativa de almacenar los datos 1, 5, 6, 8, 9, 10 y 11 de la misma.

Sistema de pesaje de vehículos en movimiento tipo IV

El sistema de pesaje tipo IV trabaja desde el reposo (pesaje estático) hasta 16 km/h. Para cada vehículo sujeto de ser medido su peso, el sistema debe generar el conjunto de datos de la Tabla 2.1, excepto los puntos 7, 9, 12 y 13. El sistema debe también estimar la carga por llanta, eje, grupo de ejes y el peso bruto del vehículo, así como su velocidad y su aceleración mientras éste pasa sobre los

sensores del sistema. La información recabada deberá mostrarse en pantalla, proporcionar copia de los datos para una revisión inmediata y permitir un almacenamiento permanente.

2.3 Requerimientos de repetibilidad y funcionalidad

Aunque en México no se han establecido con precisión los requerimientos asociados con la aplicación de los sistemas de pesaje dinámico, la norma ASTM E1318 contempla especificaciones sobre la capacidad y repetibilidad de las mediciones para cada tipo de sistema dentro de un margen de confiabilidad de 95%, como se muestran en la Tabla 2.2. Esta norma proporciona, además, un método de prueba para determinar la conformidad con estos requerimientos.

Tabla 2.2
Requerimientos de desempeño funcional de los sistemas de pesaje de vehículos en movimiento.

Función	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Valor $\geq$ lb (kg)*	$\pm$ lb (kg)
Carga en la llanta	$\pm 25\%$		$\pm 20\%$	5000 (2300)	250 (100)
Carga en el eje	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$	$\pm 15\%$	12000 (5400)	500 (200)
Carga en el grupo de ejes	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	25000 (11300)	1200 (500)
Peso bruto del vehículo	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 6\%$	60000 (27200)	2500 (1100)
Velocidad			± 2 km/h		
Espaciamiento entre ejes			± 150 mm		

*Valores menores no son comunes en los reglamentos.

De acuerdo con lo especificado en la norma para los sistemas I y II, debe ser posible clasificar el vehículo según el arreglo de ejes. La misma norma contempla que el sistema debe incorporar el equipo y el control de registros (paquete de cómputo) necesarios para obtener esta clasificación, a partir de la información del número de ejes y su espaciamiento obtenida por el sistema de pesaje.

2.4 Requerimientos para la operación del sistema de pesaje

El funcionamiento apropiado de los sistemas de pesaje depende tanto de una adecuada instalación de los equipos que componen el sistema, como del manejo de éstos por parte del usuario. Para promover su correcto desempeño es necesario que una sección de la carretera, antes y después del lugar en que será instalado el sistema de pesaje dinámico, se acondicione o se construya con características especiales. Estas características deben reflejarse en una disminución de efectos externos que alteren el proceso de medición y la medición misma, como la vibración en el vehículo debida a la rugosidad del camino, con objeto de tener una mayor precisión en la lectura obtenida. Por tanto, el perfil de este tramo debe cumplir con los siguientes aspectos:

- La curvatura horizontal del carril de la carretera en el que se ubiquen los sensores del sistema de pesaje, debe tener un radio no menor de 1,7 km, medidos

a lo largo de la línea central del carril. Esto es aplicable para todos los tipos de sistemas de pesaje.

- La pendiente longitudinal de la superficie de la carretera del sitio de colocación de los sensores del sistema de pesaje no debe exceder del 2%, aplicable a las instalaciones para los sistemas del tipo I, II y III, mientras que no debe exceder del 1% para instalaciones del tipo IV.

- La pendiente transversal (pendiente lateral) de la superficie de la carretera para este sitio, no debe exceder del 2% para las instalaciones del tipo I, II y III y del 1% para estaciones del tipo IV.

- El ancho del carril pavimentado de la carretera debe estar comprendido entre 3,0 y 3,7 m. Para sistemas del tipo III y IV, los bordes del carril a lo largo de esta distancia, deben estar señalados con una línea sólida blanca de 100 a 150 mm de ancho, con al menos 1 m de claro adicional a ambos lados del carril donde se ubique el sistema de pesaje.

- La superficie del pavimento debe mantenerse en una condición tal, que un disco de 150 mm de diámetro y 3 mm de espesor, no pueda pasar por debajo de una barra recta de 6 m de longitud que recorra el área comprendida entre los bordes del carril, partiendo de la ubicación de los sensores.

Además de los aspectos anteriores, se deben tener consideraciones particulares respecto al tipo de suelo y cimentación del camino, al medio ambiente, al suministro de energía y algunas otras características relativas al funcionamiento de los equipos involucrados, sugeridas por el proveedor de los componentes del sistema de pesaje.

Asimismo, la norma ASTM E1318 tomada aquí como referencia, describe un método de prueba para evaluar el comportamiento de cada tipo de sistema de pesaje de vehículos en movimiento. Este método particulariza, primeramente, los procedimientos para ejecutar una prueba de aceptación, independientemente del tipo de sistema de pesaje; en segundo lugar, describe el proceso de calibración inicial en el sitio de aplicación al momento de la instalación, o cuando por alguna razón han cambiado las condiciones del sitio. Lo anterior, para asegurar el buen desempeño y el uso adecuado de cada uno de los subsistemas del sistema global de pesaje de vehículos en movimiento.

2.5 Reglamentos sobre pesos y dimensiones en México

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a través de la Dirección General de Autotransporte Federal, puso en vigor el documento “Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal” [3], publicado en Enero de 1994 y modificado conforme al decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de Mayo de 1996. El objeto de este reglamento es el de regular el peso, las dimensiones y la capacidad a que se deben someter los distintos tipos

de vehículos, de autotransporte de pasajeros, de transporte de turismo y del transporte de carga, que transitan en los caminos de jurisdicción federal.

En el capítulo II de este reglamento se menciona que la SCT vigilará e inspeccionará que la capacidad, el peso bruto vehicular y las dimensiones de los vehículos que transiten por caminos y puentes federales, cumplan con lo ahí establecido. Con base en ese compromiso, se menciona que la revisión del peso y las dimensiones se realizará en operativos de control que autorice la misma SCT, o en centros de control de pesos y dimensiones acreditados, que para tal efecto se establezcan. Estos centros de control podrán ser operados por la propia SCT o bien por terceros autorizados, en los términos de las disposiciones legales vigentes aplicables en la materia.

Consecuentemente, en el capítulo VII del citado se hace mención de las sanciones aplicables en caso de sobrecarga. Las especificaciones sobre pesos y dimensiones permisibles de acuerdo al tipo de vehículo y al tipo de camino, dadas conforme a las combinaciones vehiculares que transitan en las carreteras, se proporcionan a detalle para condiciones de pesos máximos por tipo de eje y camino, y por tipo de vehículo y camino.

Una vez que se ha considerado el reglamento vigente en México, es importante enfatizar que muchos de los sistemas que son desarrollados en otros países bajo requerimientos y funciones específicas, no pueden ser totalmente aplicados en México, debido a las diferencias en la normatividad, a las condiciones topográficas del país y a la manera particular en que dichos reglamentos podrían ser llevados a la práctica. Considerando los aspectos anteriores se elaboró un procedimiento con un enfoque didáctico para capacitar a las personas involucradas en la ejecución de este reglamento, apoyándose en la publicación de un “Procedimiento del Operativo para la Verificación del Peso y Dimensiones de los Vehículos que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal” [4].

El esfuerzo prolongado para el establecimiento y puesta en marcha de este tipo de reglamentos es un reflejo de la importancia que tiene la regulación del tránsito sobre las carreteras nacionales. Esto parte fundamentalmente de un intento combinado por incrementar los niveles de seguridad y disminuir la magnitud del daño provocado a la infraestructura carretera, derivado en mayor grado de entre otros muchos factores, de los excesos en velocidades de operación, en pesos y en las dimensiones de los vehículos.

3 Principios aplicados al pesaje dinámico

3.1 Técnicas de medición

En los diversos campos de la ingeniería se hace uso de las propiedades de los materiales, que pueden ser mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas u ópticas, para la medición de variables físicas. En el caso de la determinación del peso de los vehículos, se han utilizado básicamente propiedades de los dos primeros grupos que, sin un mayor grado de complejidad para su instrumentación, son aplicables prácticamente de manera directa. Tal es el caso de la deformación que experimenta un cuerpo sometido a una fuerza, o la variación de la presión hidráulica en un recipiente y el cambio de la resistencia o el voltaje en un componente eléctrico.

3.1.1 Medición con base en la deformación y la resistencia eléctrica

Con el descubrimiento de la relación entre esfuerzos y deformaciones en materiales sometidos a cargas mecánicas, enunciada por Robert Hooke, además del descubrimiento posterior de Lord Kelvin referente a las variaciones en la resistencia que sufre un conductor eléctrico cuando se modifica su geometría, se establecieron los principios fundamentales de la extensometría eléctrica. Así, un extensómetro, también conocido como galga extensométrica o “strain gage”, es un elemento que actúa como transductor, transformando la variación de una magnitud mecánica, como la fuerza o la deformación, en la variación de una magnitud eléctrica, como la resistencia o el voltaje.

La técnica de la extensometría consiste básicamente en adherir una resistencia eléctrica deformable, llamada galga extensométrica, a un elemento estructural de interés (Figura 3.1), que permita determinar las fuerzas actuantes en función de los esfuerzos presentes, de manera que la galga esté sujeta a la misma deformación que experimente el elemento estructural. Esta deformación producirá que el valor de la resistencia cambie debido a los cambios en su geometría. De esta forma, el cambio en la resistencia eléctrica indicará un cambio en la deformación, que a su vez se relaciona con las fuerzas que actúan sobre el elemento instrumentado.

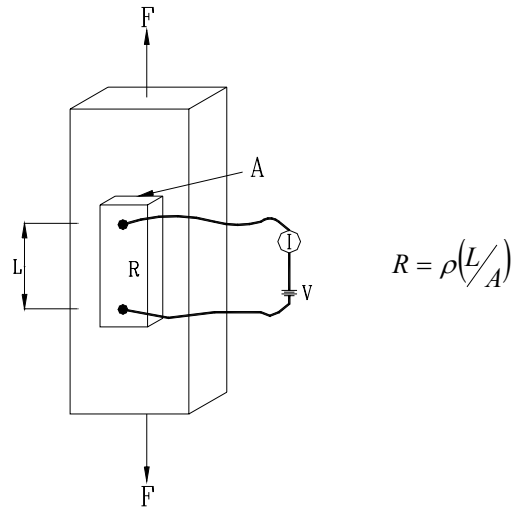


Figura 3.1
Principio de extensometría eléctrica.

3.1.2 Medición con base en la presión hidráulica

Las aportaciones de Blais Pascal a la Mecánica, referentes a la transferencia de la presión de un fluido contenido en un recipiente a otro conducto o recipiente comunicado al primero, han sido también la base para la medición de diversas variables físicas.

Como puede observarse en la Figura 3.2, dos recipientes de diferentes características geométricas que comparten el mismo fluido, pueden ser utilizados para equilibrar una carga desconocida a partir de las áreas de las cubiertas deslizantes, en este caso A_1 y A_2 , y la presión p que se genera en todo el contenedor del líquido por la aplicación de la carga. De esta manera se tiene lo siguiente:

$$\frac{F_1}{A_1} = p = \frac{F_2}{A_2} \quad (3.1)$$

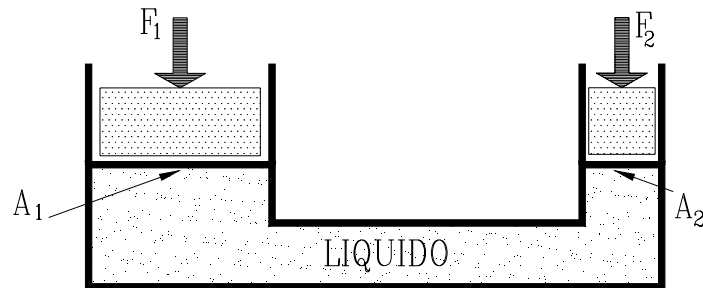


Figura 3.2
Principio de extensometría eléctrica.

Si la carga desconocida, F_1 , actúa directamente sobre la superficie A_1 , el recipiente menor (A_2) se constituye funcionalmente en un indicador de presión (manómetro) que equilibra la presión generada p ; tal fuerza puede entonces conocerse a partir de esta presión y la resistencia interna del manómetro F_2 .

3.1.3 Medición con base en carga y voltaje eléctricos

De los distintos materiales de ingeniería cuyas propiedades los hacen aplicables como transductores mecánico-eléctricos, están los denominados cristales piezoeléctricos. Este tipo de material, tal como el cuarzo y la sal de Rochelle entre otros, tiene la característica de generar una carga eléctrica proporcional a la carga mecánica a la que es sujeto, particularmente una carga de compresión o de corte. Esta carga puede ser manejada eléctricamente para ser indicada como un voltaje o una corriente.

Otra propiedad eléctrica útil para traducir una carga mecánica en una señal eléctrica, es la capacitancia. Un dispositivo típico de esta clase consiste de dos placas paralelas separadas por un material dieléctrico. La variación de la distancia que separa las placas, en función del material dieléctrico, produce una carga eléctrica que también es proporcional al voltaje entre las placas. La variación en la distancia entre las placas puede ser producida por la acción de una fuerza o una carga mecánica, cuya magnitud corresponderá con la variación del voltaje en el sistema, o con mayor sofisticación, relacionada con la frecuencia de oscilación del sistema capacitivo como un conjunto electrónico.

3.2 Extensometría

3.2.1 La resistencia eléctrica como indicador de deformación

Los medidores de esfuerzo conocidos como extensómetros eléctricos, han sido una de las herramientas más poderosas en el campo experimental de análisis de esfuerzos. Su importancia como técnica para determinar esfuerzos mecánicos se ha incrementado debido a la creciente diversidad de aplicaciones en las distintas áreas de la ingeniería.

El extensómetro es un dispositivo físico simple, usado para medir la deformación unitaria (cambio en longitud referida a una longitud original), con base en la elasticidad mecánica y en la resistividad eléctrica de los materiales y su sensibilidad a la deformación, [18, 19]. Este dispositivo es aplicado de una manera tal, que se deforma conjuntamente con el material objeto del estudio, modificando la resistencia eléctrica del extensómetro. La operación de los extensómetros tiene como base la sensibilidad que algunos materiales, conductores de electricidad, tienen a la deformación. Esta sensibilidad se define como la relación del cambio relativo de la resistencia eléctrica del conductor, entre el cambio relativo sufrido en la longitud, de manera que:

$$\frac{\Delta R}{R} = F_s \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

donde:

F_s : Factor de sensibilidad a la deformación

R : Resistencia inicial del conductor

ΔR : Cambio en la resistencia del conductor

L : Longitud inicial del conductor

ΔL : Cambio en la longitud del conductor

De la expresión anterior, $\Delta R/R$ se refiere al cambio unitario en la resistencia, mientras que $\Delta L/L$ indica la deformación unitaria que sufre el conductor, resultando por tanto un factor de sensibilidad adimensional.

La resistencia eléctrica de un conductor que tiene una sección transversal uniforme A , se da por la relación [18, 19]:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (3.3)$$

donde ρ es la constante de resistividad (inverso de la conductividad) del material conductor, y A es el área de la sección transversal del conductor.

Si un alambre recto es estirado elásticamente se incrementará su longitud y, debido al efecto de *Poisson*, la sección transversal disminuirá. Puesto que las sensibilidades de deformación son muy bajas, esto es, los cambios en resistencia son del orden de cientos a miles de partes por millón, para niveles de deformación normalmente encontrados en elementos mecánicos esforzados, no es posible obtener una indicación directa del cambio en la resistencia con un medidor de resistencia de tipo normal. Por ello, se utilizan otro tipo de indicadores, como se describe en el siguiente punto.

3.2.2 Conversión de resistencia a voltaje

La limitante en la medición de la deformación a través del cambio en la resistencia se supera con un proceso intermedio de conversión del cambio en resistencia eléctrica a un cambio en voltaje, el cual resulta mucho más sencillo de medir. Básicamente, los circuitos eléctricos útiles para este tipo de aplicaciones son el potenciómetro y el puente de *Wheatstone*, entre cuyas ventajas se cuentan las de controlar efectos por cambios de temperatura, de facilitar el manejo de la señal eléctrica y el de determinar los efectos de cargas mecánicas actuantes en el elemento instrumentado a partir de estas señales.

Potenciómetro

El circuito eléctrico básico del potenciómetro (Figura 3.3), frecuentemente aplicado en extensómetros de deformación dinámica, convierte la salida $\Delta R/R$ de los extensómetros en una señal de voltaje ΔE .

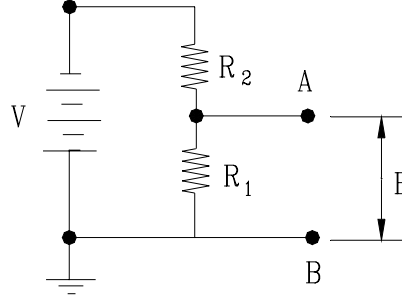


Figura 3.3
Representación básica del circuito del Potenciómetro, [18].

El voltaje de salida E , para el circuito abierto con las resistencias fijas R_1 y R_2 , puede expresarse como [18]:

$$E = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V = \frac{1}{1+r} V \quad (3.4)$$

donde V es el voltaje de alimentación y $r = R_2/R_1$, la razón de resistencias del circuito.

Al haber un incremento en las resistencias R_1 y R_2 que originen un cambio ΔR_1 y ΔR_2 , el cambio ΔE del voltaje E se determina como sigue [18]:

$$\Delta E = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) (1-\eta) V \quad (3.5)$$

donde el término η considera las no linealidades del circuito.

Normalmente, el error introducido por la no linealidad del circuito es tan pequeño que puede ser despreciado en la aplicación práctica, siendo de alrededor de un 2% para deformaciones entre 1 y 10%, dependiendo del valor de la razón de resistencias r . Sin embargo, es recomendable analizar cada caso de instrumentación antes de su aplicación para el análisis de un elemento mecánico.

La sensibilidad del circuito del potenciómetro, S_p , se define como la razón del voltaje de salida dividido por la deformación ε , esto es, [18]:

$$S_p = \frac{\Delta E}{\Delta L/L} = \frac{\Delta E}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

En particular, para aplicaciones dinámicas donde las deformaciones medidas son generalmente muy pequeñas, es necesario que S_p sea tan grande como sea posible, con objeto de reducir el grado de amplificación necesaria para tener una buena lectura de la señal de salida.

Puente de Wheatstone

Otro de los circuitos eléctricos comúnmente usados en la conversión de la señal de resistencia en un voltaje medible, es el llamado Puente de *Wheatstone* (Figura 3.4), constituido por cuatro brazos que se representan con cuatro resistencias, [18, 19]. Semejante al potenciómetro, el puente de Wheatstone se aplica en la medición de deformaciones tanto estáticas como dinámicas, sufridas por los extensómetros. Además de que este dispositivo puede emplearse como un instrumento de lectura directa de la deformación, este puente puede también utilizarse como un sistema de balance nulo, es decir, donde el voltaje de salida ΔE se ajusta a un valor cero balanceando la resistividad del puente.

El cálculo del voltaje de salida está dado por:

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V \quad (3.7)$$

Este voltaje de salida E será cero si se cumple la condición de balance del puente, es decir,

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (3.8)$$

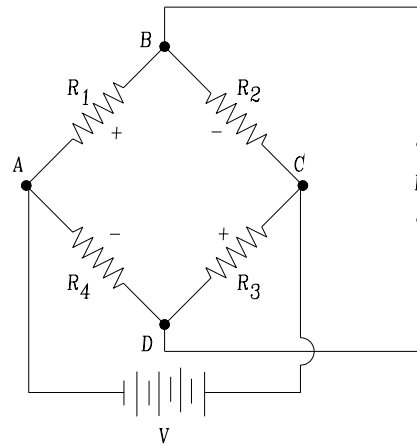


Figura 3.4

Representación básica del circuito Puente de Wheatstone, [18, 19].

Si las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_4 sufren un cambio ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 y ΔR_4 , respectivamente, el cambio en el voltaje de salida, ΔE , siendo $r = R_2/R_1$, es,

$$\Delta E = V \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.9)$$

Al igual que en el circuito del potenciómetro, la sensibilidad desarrollada para el puente de *Wheatstone* es, [18]:

$$S_c = V \frac{r}{(1+r)^2} n F_s \quad (3.10)$$

donde n se refiere al número de resistencias activas (extensómetros).

Esta sensibilidad es aplicable en el caso en el que el voltaje V de excitación del puente se mantenga fijo e independiente de la corriente del extensómetro. La expresión anterior muestra también que la sensibilidad depende del número de brazos o resistencias activas y del factor de sensibilidad a la deformación del extensómetro, siendo máxima (igual a 1) cuando se utilizan los cuatro brazos activos del puente y $r = 1$.

Para la lectura del voltaje de salida teniendo sólo un extensómetro activo, conocido como arreglo en cuarto de puente, una de las prácticas convencionales sería el que los brazos R_3 y R_4 sean resistencias de precisión con un mismo valor. La resistencia R_2 sería entonces una resistencia de precisión igual a la resistencia R_1 que aún no ha sido esforzada. Bajo estas condiciones, el voltaje que circula a través de R_1 y R_4 es igual y el voltaje de salida E es cero. Considerando que la resistencia de R_1 cambia por un esfuerzo aplicado en ella, entonces habrá un cambio ΔE , variando tanto la polaridad como la magnitud de acuerdo con R_1 ; esto es lo que se refiere comúnmente como un puente desbalanceado. Este cambio proporciona una relación lineal entre E y R_1 , siempre y cuando la resistencia de R_1 no cambie más del 1%.

En la práctica, el brazo R_2 puede ser usado como un extensómetro de compensación o como otro extensómetro que experimente los mismos niveles de deformación con polaridad opuesta. Este arreglo es conocido como medio puente y, como se menciona en párrafos anteriores, usar dos o los cuatro brazos activos del circuito (puente completo) incrementa la señal de salida, reduciendo la no linealidad que se presenta cuando se usa solamente un extensómetro.

El circuito de puente completo ofrece dos ventajas con respecto al medio puente: el voltaje de salida del circuito inicial E puede ser establecido en cero y se obtiene una máxima sensibilidad, además de eliminar la respuesta de los extensómetros debido a componentes de carga que no se consideren importantes en la medición. Esta última característica lo hace adecuado para ser aplicado como transductor, además de la particularidad de introducir una autocompensación por cambios de deformación sufridos por variaciones de temperatura.

Debido a las características enunciadas en los párrafos precedentes, estos principios, particularmente los aplicados en la extensometría eléctrica, han probado ser útiles y precisos en su empleo en dispositivos de pesaje dinámico. Combinadas estas características con algunos otros parámetros prácticos de diseño de elementos mecánicos, es posible construir un transductor de carga para estimar el peso de los vehículos, tanto estática como dinámicamente.

4 Desarrollo de un prototipo de pesaje dinámico

Se presenta un prototipo instrumentado con galgas extensométricas para utilizarse en la determinación dinámica del peso de vehículos ligeros. Primeramente, se describen los principales aspectos considerados en su diseño, en su fabricación y en su instrumentación, así como el diseño de un dispositivo preliminar para probar la factibilidad de aplicación de los principios de la extensometría para determinar el peso de vehículos.

4.1 Descripción

4.1.1 Aspectos generales

El peso de un vehículo se determina por el efecto de la aceleración de la gravedad de la tierra sobre su masa. Puesto que prácticamente el valor de la aceleración de la gravedad es constante, para conocer el peso de un vehículo bastaría con conocer su masa. Sin embargo, la fuerza que un vehículo transmite al pavimento durante su movimiento no es una fuerza constante, por lo que resulta necesario utilizar un dispositivo que proporcione la información suficiente para determinar su peso. Los dispositivos aplicados para este fin requieren estar colocados en la superficie del piso que, para el caso de los vehículos en movimiento, deben estar sobre la trayectoria de tránsito.

El prototipo objeto de este trabajo es un dispositivo mecánico, cuya capacidad de carga nominal proyectada es la equivalente a la soportada por una llanta en el extremo de cada eje de un vehículo de aproximadamente 12000 N de peso. Este dispositivo es construido con materiales comercialmente disponibles en México, haciendo uso de la aplicación de la técnica de extensometría.

El prototipo se caracteriza por la configuración de los elementos mecánicos considerados en su diseño y por el tipo de instrumentación utilizada. El dispositivo se fundamenta en la flexión de dos placas en voladizo (un extremo apoyado y el opuesto sin apoyo), las cuales soportan la carga transmitida por el paso de un vehículo. En el diseño se aplica una instrumentación con galgas extensométricas partiendo de un arreglo base del tipo puente de *Wheatstone*, que traduce la deformación sufrida por las cargas aplicadas en una señal de voltaje.

Para los fines de valoración del dispositivo, la señal de voltaje generada en pruebas de laboratorio se maneja con instrumentos sencillos de medición de parámetros eléctricos, así como sistemas de adquisición de datos simples. Sin embargo, el manejo, la adquisición y el ulterior manejo de datos son aspectos que pueden detallarse y mejorarse con un diseño electrónico y de programación computacional adecuados, pero que no son contemplados en los alcances de este trabajo.

4.1.2 Consideraciones de diseño

La parte medular de los sistemas de evaluación de cargas dinámicas de vehículos ligeros en movimiento es el dispositivo sensible a la carga. Puesto que prácticamente no hay un medio físico que pueda determinar directamente el peso de los vehículos, el dispositivo sensible es un transductor que se instala sobre la trayectoria del vehículo. El paso de éste por encima del dispositivo permite estimar la magnitud de la carga transmitida al piso a través de las llantas, sin que el vehículo detenga su movimiento. El dispositivo, por tanto, “mide” la carga dinámica de la llanta al pasar sobre él, utilizando alguno o varios de los principios físicos mencionados. A partir de los datos emitidos por el dispositivo, se hacen los ajustes pertinentes de acuerdo a factores que pueden ser físicos, topográficos, climáticos, mecánicos, eléctricos, etc., para estimar la carga estática del vehículo.

Los requerimientos primarios del diseño para el dispositivo expuesto incluyen:

I) Construcción de bajo costo. En buena medida, esto se logra en lo posible con materiales y componentes disponibles en el mercado nacional. Consecuentemente, para la instrumentación se selecciona la aplicación de la técnica de extensometría, considerando que los extensómetros o galgas extensométricas son elementos de bajo costo en comparación con otras técnicas de instrumentación.

II) Exactitud o precisión. La estimación de la carga estática con base en la lectura (interpretada en carga) del dispositivo de pesaje, debe tener cuando mucho un margen de error del 10% del valor estático de la carga en la llanta, según se recomienda en las normas internacionales [10].

III) Repetibilidad. Las lecturas resultantes de las mediciones en campo deben ser repetibles dentro de un intervalo de velocidades (desde la inmovilidad hasta 30 km/h). Las lecturas dadas por el dispositivo no deben ser en lo posible una función del tipo de pavimento (suave, duro, asfalto, concreto). Se acepta una baja repetibilidad para altas velocidades y variaciones con las condiciones del camino, pues en la llanta se generan desplazamientos verticales significativos.

IV) Capacidad y tamaño. El tamaño de la plataforma debe ser tal, que la llanta más ancha, usada por un vehículo ligero, pueda pasar completamente y sin dificultad sobre ésta. Para ello un ancho de 0,60 m es deseable, el cual es más grande que 2 veces el ancho de una llanta de 0,295 m. El diseño además requiere que el dispositivo deba ser capaz de soportar una carga de 2,5 kN y la posibilidad de una sobrecarga del 100%.

4.2. Diseño preliminar

4.2.1 La deformación como transductor de fuerza

Uno de los aspectos importantes a considerar en el desarrollo del dispositivo de pesaje de vehículos en movimiento, es que debe ser sensible a la carga que produce una llanta en un lado del eje, cuando ésta pase sobre cualquier punto de la plataforma del dispositivo de pesaje. Por ello, el punto por donde pase la llanta, no debe ser un factor que altere el valor de la carga producida por el peso.

El diseño consiste de una plataforma rígida soportada por dos vigas en voladizo, como se muestra en la Figura 4.1. Los elementos de contacto entre la plataforma y las vigas en voladizo deben actuar como apoyos simples, transmitiendo verticalmente la fuerza P únicamente hacia abajo a través de estos apoyos.

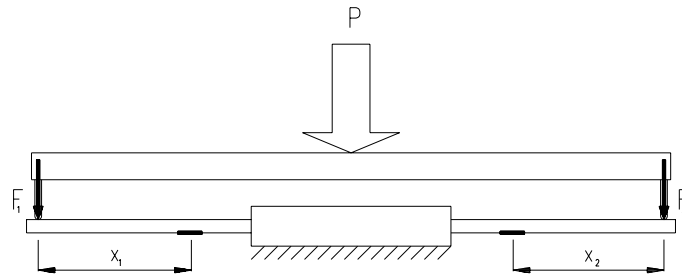


Figura 4.1
Concepto básico del prototipo de vigas en voladizo.

Del esquema anterior se puede deducir que para la condición de equilibrio, sin importar la posición horizontal de la fuerza P , siempre y cuando esté entre los puntos en que actúan F_1 y F_2 , se cumple que:

$$P = F_1 + F_2 \quad (4.1)$$

Para los puntos x_1 y x_2 en cada viga indicados en esa figura, si $x = x_1 = x_2$, se tiene que la equivalencia de momentos flexionantes es:

$$F_1 x_1 + F_2 x_2 = (F_1 + F_2) x = P x \quad (4.2)$$

Si ambas vigas tienen dimensiones transversales b y h , ancho y espesor, respectivamente, el esfuerzo producido por los momentos de flexión $F_1 x_1$ y $F_2 x_2$, en los puntos localizados a x_1 y x_2 de estas fuerzas, son:

$$\sigma_{x_1} = \frac{6 F_1 x_1}{b h^2} \quad (4.3)$$

y

$$\sigma_{x_2} = \frac{6F_2x_2}{bh^2} \quad (4.4)$$

Lo anterior, partiendo de que el momento de inercia geométrico es $bh^3/12$.

Para vigas del mismo material con módulo de elasticidad E , la deformación unitaria ε_x , en un punto x , sería:

$$\varepsilon_x = \frac{6Fx}{Ebh^2} \quad (4.5)$$

Por tanto, la deformación unitaria ε en dos puntos simétricos (uno en cada viga) a una distancia x , es:

$$\varepsilon = \frac{6Px}{Eb h^2} \quad (4.6)$$

De esta expresión se desprende que, para el intervalo elástico de deformación del material, la carga aplicada P se puede obtener en función de la deformación unitaria, como se expresa a continuación:

$$P = \frac{Ebh^2}{6x} \varepsilon \quad (4.7)$$

En la expresión anterior, ε se refiere a la suma de las deformaciones presentes en los puntos correspondientes a la distancia x del empotramiento.

4.2.2 Prototipo preliminar

Aspectos mecánicos

Para probar el concepto descrito en el apartado anterior, se desarrolló un prototipo preliminar. Para ello se dispuso de una placa de 0,62 m de largo, 0,01 m de espesor y ancho máximo de 0,21 m de material duraluminio 6061 T6, disponible en el mercado regional. De este material se aprovecha su capacidad para resistir altos niveles de deformación comparado con otros materiales metálicos, poseyendo un módulo de elasticidad de 68,9 GPa y una resistencia a la fluencia de 275,8 MPa [20].

De acuerdo con esas dimensiones, se propuso una placa continua apoyada en su sección central, obteniendo de esta manera una viga con voladizo de 0,26 m en cada extremo, como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2
Esquema del prototipo preliminar.

Partiendo del valor del esfuerzo de fluencia del material, la máxima deformación unitaria que se puede resistir es de 0,004 (4000 microdeformaciones, $\mu\delta$). Así, para la condición de carga estipulada, la deformación máxima se presenta en la base del empotramiento. Para una carga P centrada, el valor de la fuerza aplicada en cada viga sería $F = P/2$, la cual actúa a una distancia práctica del empotramiento de 0,23 m. Ajustando la expresión (4.6) para estas condiciones, se llega a que la fuerza P máxima que el dispositivo puede soportar es de 8350 N.

Instrumentación básica

Como se comentó con anterioridad, debido a las ventajas que ofrece la extensometría se optó por colocar galgas extensométricas para medir la deformación producida por la fuerza P aplicada al dispositivo. En conformidad con las dimensiones de la placa de duraluminio como elemento sensible, en el diseño preliminar se colocó una galga extensométrica en la parte superior de una viga y otra en la parte inferior de la viga opuesta, a 25 mm del empotramiento. De esta manera, al aplicar la fuerza las galgas estarían expuestas a tensión y compresión, por lo que para tomar ventaja de la deformación experimentada por ambas vigas, las galgas fueron conectadas en un arreglo de medio puente de Wheatstone, como se ilustra en la Figura 4.3.

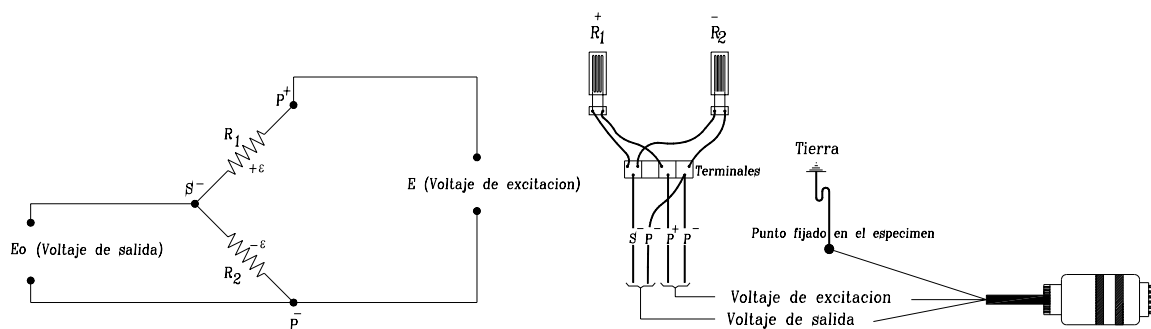


Figura 4.3
Arreglo de medio puente de Wheatstone para el prototipo preliminar.

Con esta instrumentación, el proceso típico de medición cuando se emplean galgas extensométricas es como se indica en la Figura 4.4.

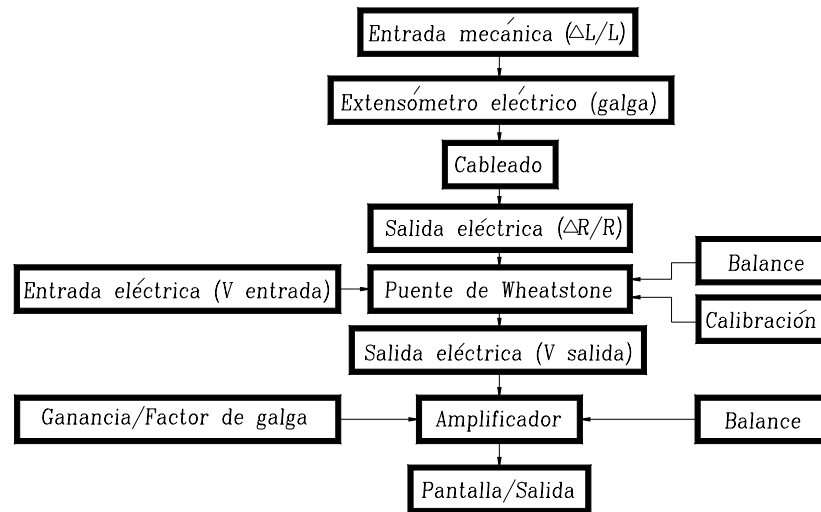


Figura 4.4

Secuencia del proceso de adquisición y despliegue de las mediciones.

Finalmente, el prototipo preliminar se fabricó como se muestra en la Figura 4.5. En esta figura se observa también parte del equipo básico de medición de deformación.



Figura 4.5

Vigas en voladizo del prototipo.

Equipo de registro

Una vez instrumentado el prototipo, el proceso de la adquisición, registro y despliegue de la señal generada por la carga mecánica, se indica en la Figura 4.4. Este proceso incluye el uso de un indicador digital de deformación marca Measurements Group, modelo P-3500 [15], el cual se conectó a las galgas de acuerdo con el esquema mostrado. La inicialización de este equipo consideró un voltaje de excitación del medio puente de 2,5 V, proporcionando directamente el valor de la deformación experimentada por las galgas extensométricas, de acuerdo al factor de galga utilizado (de 3,25). Además de esta lectura directa de deformación, se conectó un osciloscopio de almacenamiento digital marca Tektronix, modelo 2211 [17], al indicador de galgas, con el propósito de observar visualmente el comportamiento de la señal durante las pruebas, que fuera factible

de proporcionar un medio de almacenamiento del registro en tiempo. La velocidad de muestreo del osciloscopio es de 50 MHz.

Prueba de la instrumentación

Con el propósito de probar la instrumentación empleada, así como la respuesta del dispositivo, se realizó una serie de pruebas estáticas. Estas pruebas consistieron en colocar gradualmente una serie de piezas de masa conocida en una placa puesta sobre las vigas instrumentadas y midiendo la deformación obtenida, como se muestra en la Figura 4.6. Cada una de estas piezas tenía una masa de 10 kg, por lo que su peso correspondía a una fuerza de 9,81 N.



Figura 4.6

Ejecución de pruebas estáticas sobre el prototipo preliminar.

Como ejemplo de los resultados obtenidos, se muestra la Tabla 4.1 y la gráfica en la Figura 4.7. Tanto de la tabla como de la representación gráfica, puede observarse que el comportamiento es prácticamente lineal para el intervalo de fuerza aplicada, que con las dimensiones y propiedades mecánicas del material utilizadas se obtuvo un error de 3%.

Tabla 4.1

Ejemplo de resultados de pruebas en el prototipo preliminar.

Peso aplicado [N]	Deformación unitaria* [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Fuerza calculada [N]	Desviación [%]
0,0	0	0,0	-
98,1	85	97,6	-0,5
196,2	168	192,9	-1,7
294,3	253	290,5	-1,3
392,4	336	385,8	-1,7
490,5	422	484,6	-1,2
392,4	345	396,2	1,0
294,3	264	303,2	3,0
196,2	176	202,1	3,0
98,1	87	99,9	1,8
0,0	0	0,0	-

* Deformación obtenida por punto instrumentado

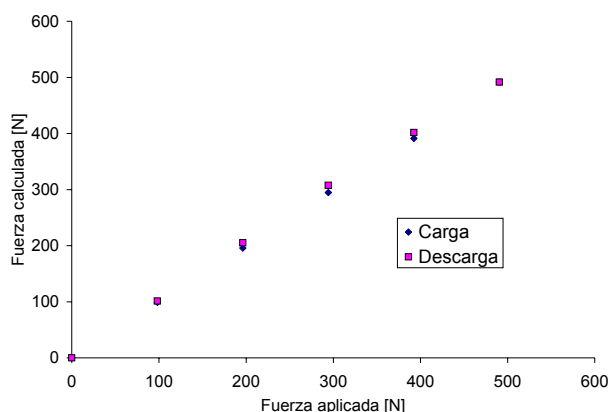


Figura 4.7

Resultados de pruebas en el prototipo preliminar.

Los resultados obtenidos, tanto en la instrumentación como en el comportamiento mecánico de las vigas, permitieron concluir esta etapa de diseño preliminar. Logrado lo anterior, se decidió aplicar el proceso para el diseño del prototipo de pesaje dinámico, en condiciones de laboratorio.

4.3 Prototipo de prueba

4.3.1 Fabricación

Disponiendo de otra placa de duraluminio semejante a la utilizada en el prototipo preliminar, ésta se preparó para ser fijada en la parte central y para colocarle cuatro galgas extensométricas. Su fabricación se llevó a cabo de acuerdo a los planos de diseño incluidos en el anexo. La Figura 4.8 muestra el plano general en escala reducida, en el que se indican los principales elementos mecánicos considerados en el diseño del dispositivo.

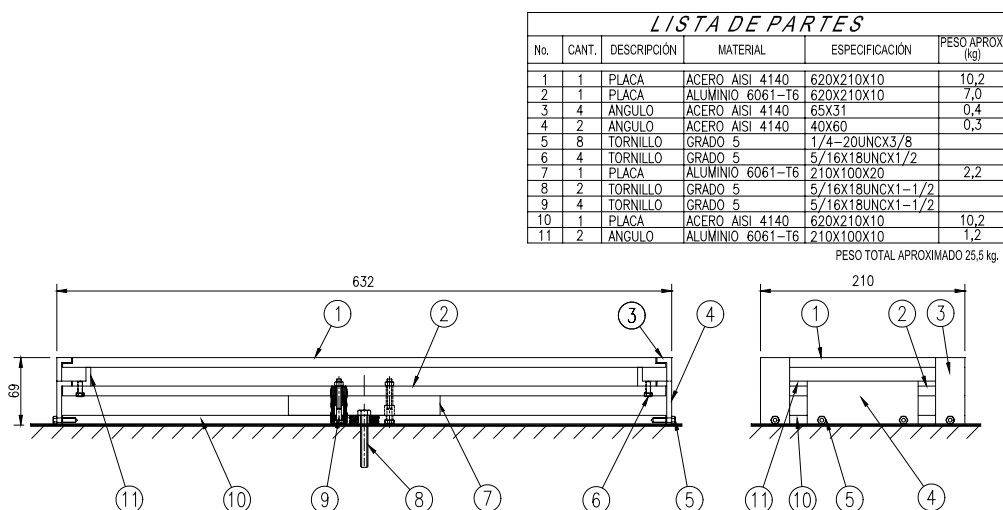


Figura 4.8

Esquema técnico del prototipo.

En este esquema se muestra la placa superior, de acero comercial, la cual es encargada de recibir las cargas de la llanta, de manera que sean transmitidas a las placas en voladizo. Se muestran también otros aditamentos y accesorios para asegurar el buen desempeño mecánico de los elementos principales. El ensamble mecánico del prototipo concluido se presenta en la Figura 4.9, identificándose en la parte media la placa de duraluminio, la cual proporciona los extremos en voladizo para permitir la flexión de la misma.



Figura 4.9
Ensamble mecánico del prototipo de pesadora de vigas en cantilibre.

Los componentes principales del dispositivo fueron manufacturados en un taller de máquinas herramienta convencional, sin requerir preparaciones especiales.

4.3.2 Instrumentación práctica

Arreglo y tipo de extensómetros

Puesto que el dispositivo sería expuesto a múltiples ciclos de carga y descarga, se seleccionaron galgas extensométricas del tipo dinámico. El extensómetro seleccionado, identificado como WD-DY-125AD-350 de la empresa Measurements Group, tiene las características indicadas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2
Principales características de las galgas WD-DY-125AD-350.

Tipo	WD: Aplicación dinámica, completamente encapsulada en fibra de vidrio reforzada, con terminales de alta resistencia a la fatiga y ambientes severos
Longitud activa	3,2 mm (0,125 in)
Resistencia	350 Ohms $\pm$ 0,6% a 24°C
Factor de galga	3,25 $\pm$ 3% a 24°C
Aplicación	Mediciones dinámicas
Intervalo de temperatura	-195 a 260°C
Límites de deformación	$\pm$ 1%
Linealidad	Por debajo de 0,3%
Pegamento	Adhesivos epóxicos de alta temperatura

De las características de las galgas sobresale su límite de deformación para el caso lineal, de 0,003 (3000 $\mu\delta$). Conforme a este límite y evitando posibles concentraciones locales de esfuerzos (principio de Saint Venant), las galgas se colocaron a 30 mm del empotramiento, tanto en la cara superior como en la inferior de las dos vigas. Dichas galgas pudieron ser conectadas en un arreglo de puente de Wheatstone, colocadas de manera que compensa las variaciones por efectos de temperatura y provee una mayor sensibilidad, cuatro veces mayor que usando una sola resistencia activa.

De acuerdo a la ubicación de las galgas y su deformación máxima, la máxima carga esperada que pudiera soportar el dispositivo es de 7230 N. Esta fuerza produce una deformación teórica por placa de 3900 $\mu\delta$ en la base del empotramiento, lo cual es un valor cercano al límite de fluencia del material utilizado. Por esta razón, se pretende utilizar este prototipo de dispositivo con vehículos con peso menor a 4 veces la fuerza de 7230 N.

Con propósitos de registro e interpretación de los datos que se obtengan con este dispositivo, para las lecturas de deformación y voltaje con el esquema de instrumentación empleado, se aplica la expresión siguiente:

$$E_o = \frac{n}{4} k E \delta \quad (4.8)$$

donde,

E_o : Voltaje de salida del puente

n : Número de brazos activos en el puente (4 en el puente completo)

k : Factor de galga para las galgas activas

E : Voltaje de excitación del puente

δ : Deformación unitaria

La configuración básica es como se muestra en la Figura 4.10, donde se observan 4 resistencias activas.

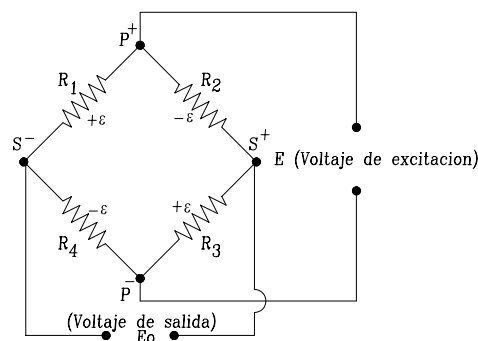


Figura 4.10

Esquema del arreglo de los extensómetros en Puente de Wheatstone.

Esperando aprovechar la máxima sensibilidad proporcionada por el puente de Wheatstone, los extensómetros indicados con signo negativo en el esquema del arreglo se colocan en la parte inferior de las vigas, de manera que experimenten compresión longitudinal, mientras que los indicados con signo positivo se colocan en la parte superior, siendo expuestas a tensión. Como se indicó en la Figura 4.7, esta instrumentación requiere adicionalmente de una fuente de voltaje que excita inicialmente al circuito, además de un dispositivo acondicionador y amplificador que permita una fácil lectura del voltaje de salida.

Partiendo del esquema de la configuración base del puente de Wheatstone, la representación física del arreglo se muestra en la Figura 4.11, indicando el extensómetro con la letra "R" y un número subíndice, que se refiere a la posición en el puente.

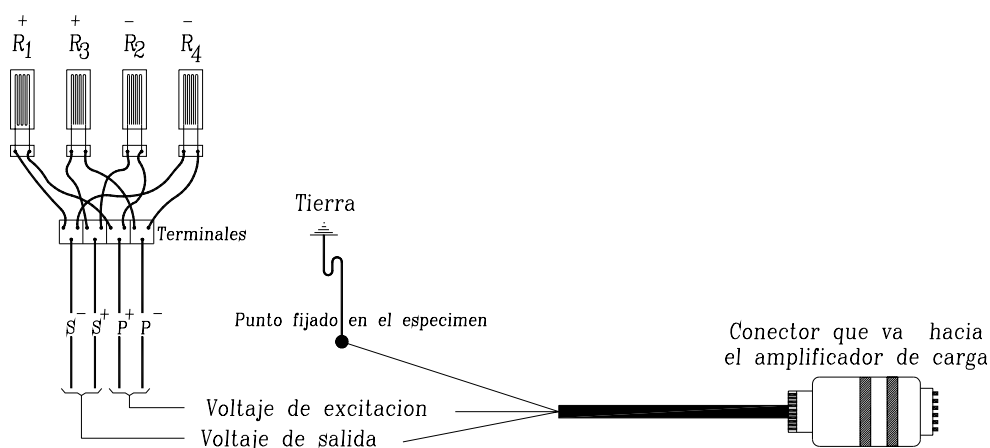


Figura 4.11
Representación física del arreglo y la conexión.

En la serie de fotografías en la Figura 4.12 se observan diversos aspectos de la colocación de las galgas sobre la placa de duraluminio.



Figura 4.12

Distintas etapas del proceso de colocación de los extensómetros, mostrando el pegado, diversos pasos para el curado y la apariencia final.

Consideraciones para la reducción del ruido eléctrico

Los voltajes producidos con el uso de circuitos a base de extensómetros eléctricos son pequeños, normalmente menores a $10 \mu\text{V}$ por $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{m}$); consecuentemente, el ruido eléctrico es una consideración importante en su diseño. Este ruido puede ser producido por campos magnéticos generados cuando las corrientes fluyen a través de cables cercanos que perturban la corriente en los cables conectados a los extensómetros.

Cuando una corriente alterna fluye a través de en un cable de perturbación, se produce un campo magnético que varía con el tiempo, el cual altera la señal induciendo un voltaje en el ciclo de la señal. El voltaje inducido es proporcional a la corriente y al área que abarca por el lazo de la señal, pero es inversamente proporcional a la distancia desde el cable de perturbación al circuito de la señal.

En el caso de la instrumentación utilizada en el prototipo se consideraron algunos aspectos para minimizar en lo posible este problema:

- Todos los cables son trenzados entre sí para minimizar el área en el lazo de la señal y para hacer las distancias iguales.
- Solamente se usan cables blindados, cuyos blindajes son conectados a una tierra física correspondiente a la señal. Si el blindaje se conecta por error tanto a la tierra de la señal como a la tierra del sistema, se forma un lazo de tierra. Ya que las tierras diferentes están rara vez al mismo voltaje absoluto, una señal de ruido puede generarse por la diferencia de potencial.

4.3.3 Colocación en sitio de prueba

Debido a las condiciones físicas y ambientales se decidió instalar el dispositivo dentro de una zona con espacio suficiente para el paso de un vehículo ligero a baja velocidad, evitando a su vez el paso de vehículos pesados que pudieran ocasionarle algún daño. El esquema de colocación se muestra en la Figura 4.13.

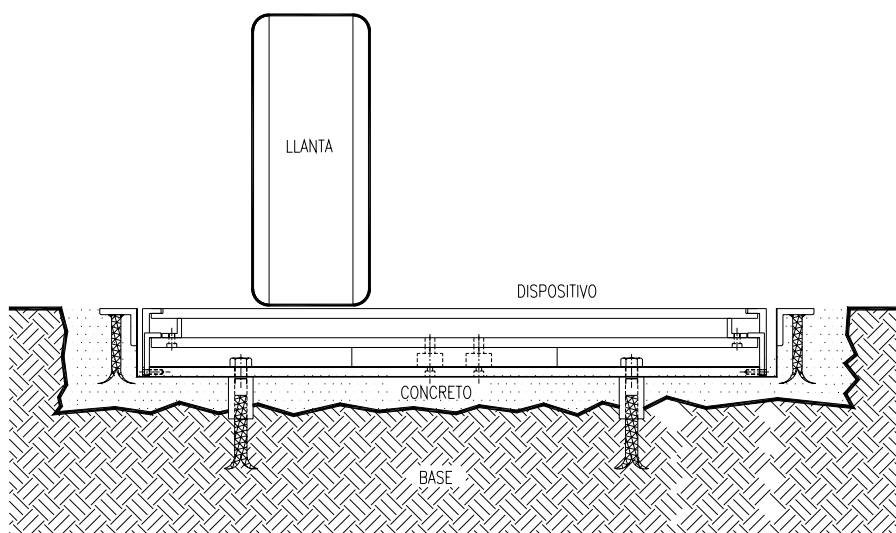


Figura 4.13

Esquema de colocación del prototipo de pesaje dinámico.

El prototipo desarrollado (Figura 4.14) tiene las características para ser instalado de una forma semipermanente, con la finalidad de poder ser retirado con facilidad en caso de ser necesario. Su peso resultante, de aproximadamente 350 N, le añade la característica de portabilidad, aunque su colocación requiere de la preparación y acondicionamiento del sitio. Otra ventaja de su tamaño es que requiere de poca profundidad, siendo ésta no mayor de 10 cm.



Figura 4.14

Prototipo de pesaje dinámico.

Para el acondicionamiento del lugar seleccionado para la colocación del dispositivo se preparó una cepa cuyas dimensiones permitieran alojar al prototipo (Figura 4.15).



Figura 4.15

Diversas etapas del proceso de instalación para pruebas en laboratorio.

Con el propósito de mantener la plataforma horizontal, se le agregó cemento hidráulico a la base para que la placa inferior se adapte a las posibles irregularidades del piso y uniformizar el apoyo de la misma. Las dimensiones de la cepa brindaron un espacio adicional para poder manejar los cables necesarios para la conexión de la instrumentación a los equipos de registro y visualización.

Una vez completada la colocación del dispositivo, se procedió a preparar el equipo de medición y registro de la señal durante las pruebas.

5 Pruebas del prototipo

Se presenta el desarrollo experimental aplicado al prototipo de pesaje. Se describen el equipo utilizado y las pruebas estáticas utilizadas para calibrar el dispositivo, así como las pruebas dinámicas realizadas con el paso de distintos vehículos ligeros.

5.1 Preparación de equipo

Como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, las galgas extensométricas relacionan la deformación mecánica con un cambio en la resistencia eléctrica. Sin embargo, el orden de los valores de los cambio de resistencia es muy pequeño, por lo que el uso de circuitos como el puente de Wheatstone, permiten aprovechar la variable de voltaje eléctrico que, en términos prácticos, es mucho más factible de medir.

Aunque el indicador de deformaciones es un equipo especializado para medir deformación cuasiestática con galgas extensométricas, para el caso de mediciones dinámicas se preparó otro equipo de medición con mejores características. Este equipo consiste principalmente de un acondicionador amplificador de señales marca Measurements Group, modelo 2210 [16], que como parte de sus características, suministra el voltaje de alimentación de las galgas en el puente de Wheatstone. Este acondicionador, con mejores características para el manejo de la señal de voltaje proporcionada por el puente durante su deformación dinámica, posee la capacidad de utilizar filtros para controlar altas frecuencias, así como otras alteraciones no deseables durante la medición. Además, proporciona un sistema de balanceo del puente, control del voltaje de alimentación, control de la ganancia de la señal y un medio de salida para registrar la señal por otro medio de almacenamiento o visualización.

Tomando ventaja de esta última característica, a la salida de voltaje del acondicionador amplificador se conectó un osciloscopio para monitorear la señal producida por la deformación de los extensómetros. El osciloscopio Tektronix 2211 [17], tiene la capacidad de almacenar datos de manera temporal y transmitirlos a una computadora para su almacenamiento definitivo, por medio de un puerto de comunicación tipo RS-232. Una vez en la computadora, estos datos pueden analizarse con mayor detalle. Este equipo se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1
Equipo utilizado en las mediciones.

5.2 Consideraciones generales para pruebas dinámicas

Aunque el dispositivo propuesto contempla el paso de vehículos ligeros a baja velocidad, el vehículo en movimiento es un sistema sumamente complejo en el que participan todos los elementos mecánicos que lo componen. A esta participación se suma el comportamiento del transductor y del pavimento, el cual, con propósitos ilustrativos se muestra en el modelo simplificado en la Figura 5.2.

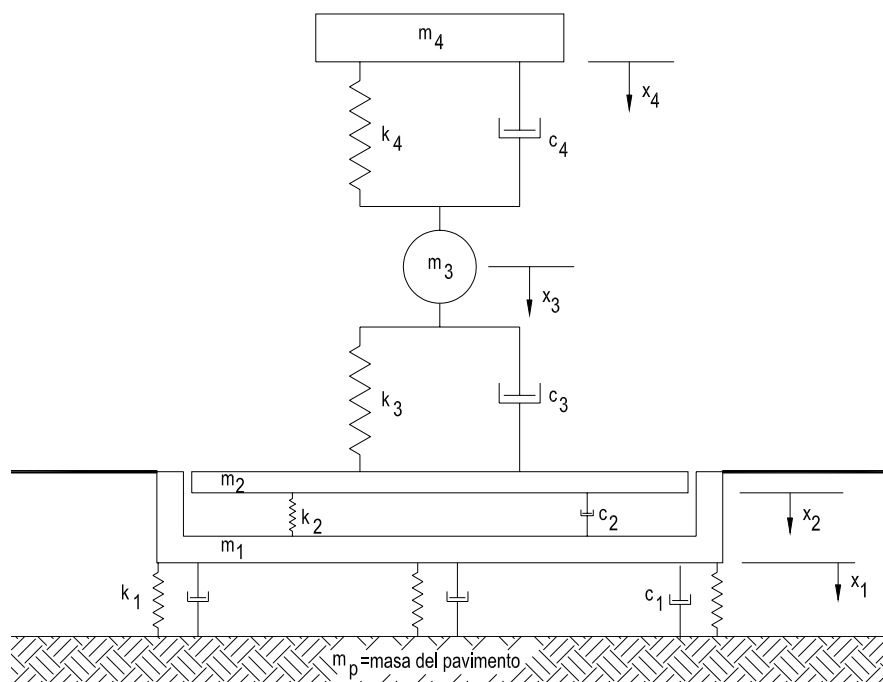


Figura 5.2
Modelo simplificado de un vehículo sobre un dispositivo de pesaje en movimiento.

En este modelo se representa la masa (m), características de rigidez (k) y de amortiguamiento (c) proporcionales del vehículo, de la llanta, del transductor activo y del marco del transductor, con subíndices 4, 3, 2 y 1, respectivamente. El pavimento, el cual soporta todos estos sistemas, se considera prácticamente de rigidez infinita, cuya masa se representa con m_p en la figura mencionada.

Del modelo de 4 grados de libertad representado, se obtienen 4 ecuaciones simultáneas que describen el comportamiento del sistema, en términos del desplazamiento, la velocidad y la aceleración verticales, [21]. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$(m_p + m_1)\ddot{x} - c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 = 0 \quad (5.1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 - k_2(x_2 - x_1) = 0 \quad (5.2)$$

$$m_3\ddot{x}_3 - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3(x_3 - x_2) = 0 \quad (5.3)$$

$$m_4\ddot{x}_4 - c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - k_4(x_4 - x_3) = 0 \quad (5.4)$$

La porción de la fuerza impartida por una llanta pasando por el subsistema pavimento-transductor de pesaje dinámico, es la cantidad de interés en la interpretación de los datos del peso en movimiento. Por este propósito, la razón de la fuerza medida con la fuerza real aplicada es [21]:

$$\frac{\text{Fuerza medida}}{\text{Fuerza real aplicada}} = \frac{k_2(x_2 - x_1)}{k_3(x_3 - x_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)} \quad (5.5)$$

En el caso de que el pavimento sea rígido y de superficie uniforme, teóricamente no habría una excitación vertical que produjera desplazamientos, velocidades o aceleraciones en los componentes del vehículo ni en el marco del transductor. En ese caso, el término x_1 en el numerador de la ecuación (5.5) sería nulo y la fuerza aplicada por la llanta sería registrada por el transductor de pesaje dinámico. Sin embargo, con algunas combinaciones de rigidez del pavimento, del marco del transductor y del transductor mismo, a medida que el desplazamiento x_1 se incrementa, la fuerza aplicada al transductor se reduce.

La medición del pesaje dinámico, además de los aspectos comentados anteriormente, depende de una gran variedad de factores. Estos factores se indican de manera resumida en el diagrama de la Figura 5.3, donde se pueden distinguir las diferentes variables que intervienen al momento de realizar un pesaje dinámico.

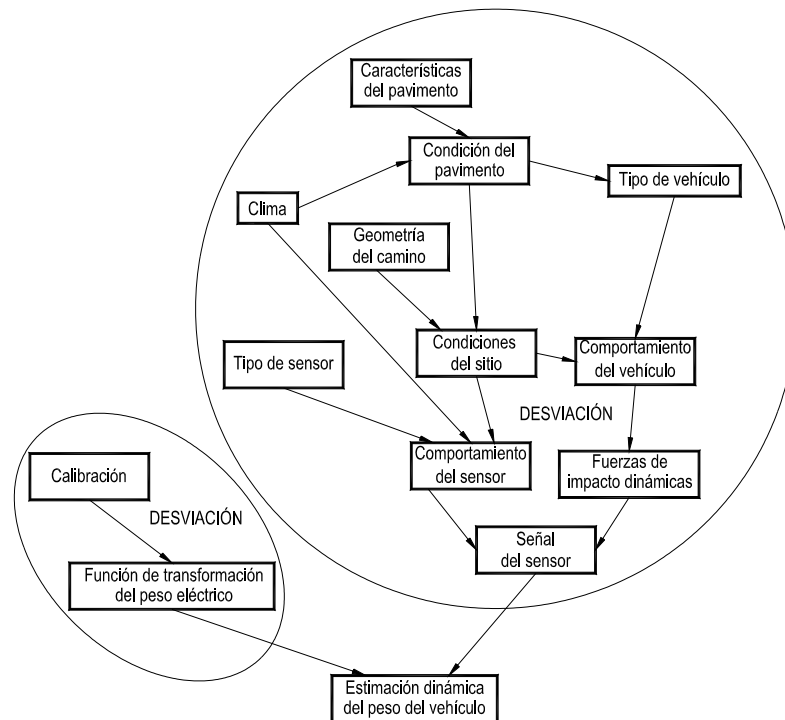


Figura 5.3

Diagrama de factores de influencia en acciones de pesaje dinámico.

5.3 Pruebas estáticas

5.3.1 Preparación de la carga

El propósito principal de ejecutar una serie de pruebas estáticas es el de conocer algunos parámetros que puedan ser utilizados tanto para verificar el funcionamiento como para calibrar el dispositivo, estableciendo de esta manera, las características de referencia. Estas pruebas fueron diseñadas para proporcionar una evaluación sencilla del prototipo, de los procedimientos de operación y de los requerimientos de instalación.

Tal como se hizo en la prueba del dispositivo preliminar descrito en el capítulo anterior, al prototipo se le colocaron una serie de masas, acomodadas de diferentes maneras con el objeto de evaluar la inmunidad de la ubicación de la fuerza vertical.

Aunque con la cantidad de masas colocadas se probó que el prototipo resistió los niveles de carga propuesto, debido a la deflexión alcanzada por las vigas en cantilibre se decidió aplicar hasta 40 masas de 10 kg cada una para obtener la calibración con el prototipo ensamblado completamente. Algunas etapas de estas pruebas se observan en la Figura 5.4. La deflexión alcanzada por las vigas puede apreciarse en la Figura 5.5.



Figura 5.4

Colocación de masas, en condición estática, sobre el dispositivo de pesaje.



Figura 5.5

Deflexión alcanzada con el peso generado con 400 kg de masa.

5.3.2 Calibración

Medición de deformación

Como primera aproximación en el proceso de calibración, se colocaron una por una las masas de 10 kg hasta acumular 400 kg sobre la placa, produciendo por tanto un peso de 3900 N. El valor de la deformación fue registrado con el indicador digital de deformación para cada masa colocada, siguiendo un proceso similar para la descarga.

Este proceso simple de carga y descarga se repitió varias veces, obteniéndose datos como los mostrados en la Figura 5.6.

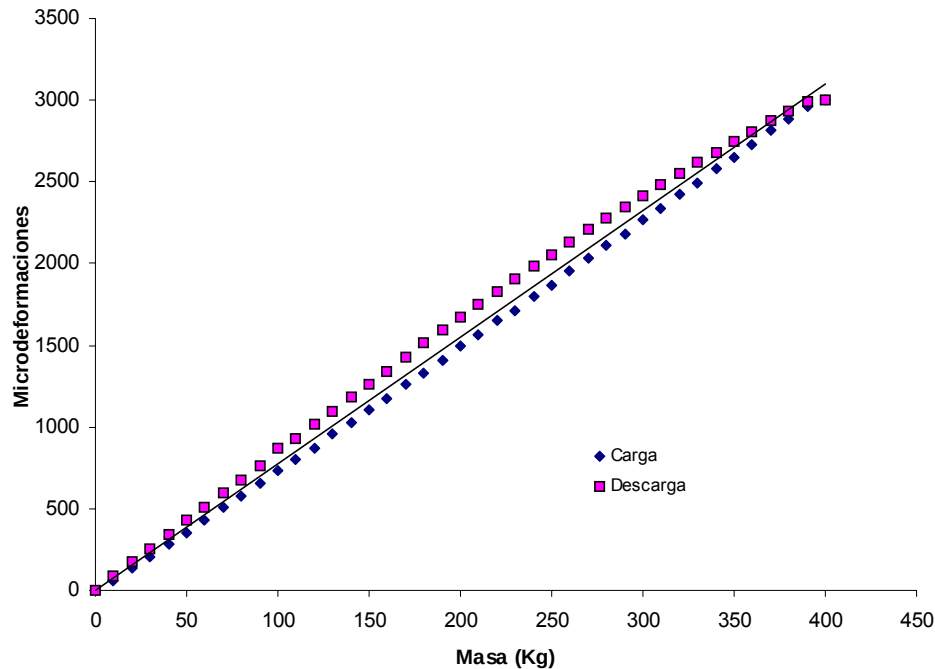


Figura 5.6

Gráfica de la deformación producida por la colocación de las masas.

En la figura se observa que el comportamiento combinado de la deformación, tanto en la carga como en la descarga, es prácticamente lineal. Los datos obtenidos de las mediciones se analizaron y se aplicó una regresión lineal, que en promedio arrojaron una relación de 1 $\mu\delta$ por cada 7,76 kg aplicados, con un valor de correlación de 0,9992.

Medición de voltaje

Dados los resultados obtenidos en la etapa previa de medición de la deformación unitaria, el prototipo fue conectado al acondicionador amplificador ya descrito. Este equipo fue establecido con una ganancia arbitraria, realizada únicamente con el propósito de obtener ventaja de sus capacidades en el manejo de la señal. El comportamiento, semejante al obtenido en la medición de la deformación, se muestra en la Figura 5.7, observándose nuevamente la linealidad del comportamiento, con correlaciones alrededor de 0,99.

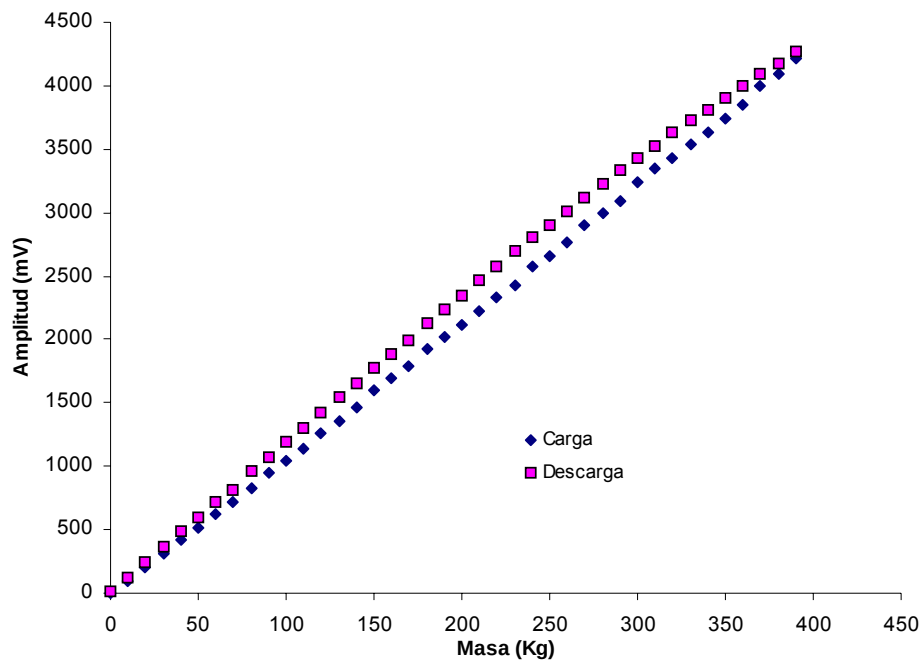


Figura 5.7

Gráfica tipo de voltaje contra masa colocada sobre el prototipo.

5.4 Pruebas dinámicas

5.4.1 Vehículos de prueba

Una vez realizadas las pruebas estáticas para verificar el comportamiento del prototipo y obtener los parámetros para establecer la calibración, se procedió a realizar las pruebas con vehículos en movimiento. Los vehículos seleccionados fueron de distintos tipos, desde compactos hasta tipo pick up (Figura 5.8), proporcionados por personal del laboratorio donde se colocó el prototipo de pesaje.



Figura 5.8a

Vehículos utilizados en las pruebas dinámicas. De izquierda a derecha, VP1 y VP2.



Figura 5.8b

Vehículos utilizados en las pruebas dinámicas. De izquierda a derecha, VP3 y VP4.

Estos vehículos fueron identificados como VP1, VP2, VP3 y VP4, cuyos datos generales, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 5.9, se muestran en la Tabla 5.1.

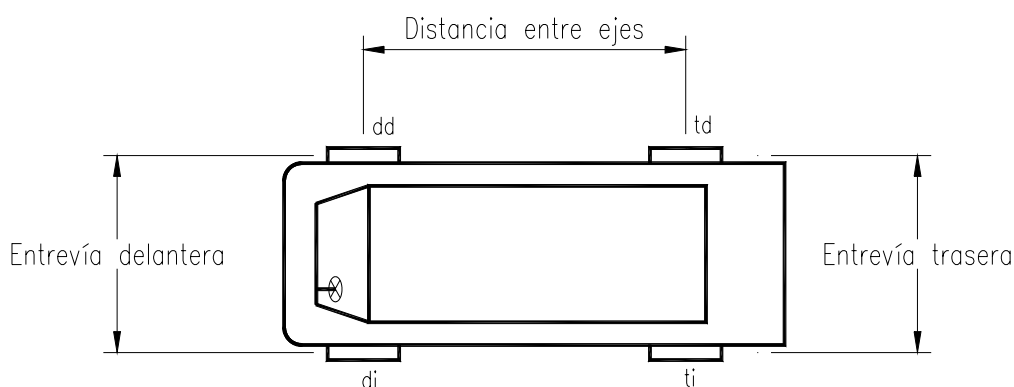


Figura 5.9

Vehículo de prueba esquemático.

Tabla 5.1
Datos generales de los vehículos de prueba.

Vehículo	Distancia entre ejes [mm]	Entrevía delantera [mm]	Entrevía trasera [mm]	Tipo de llanta
VP1	2430	1390	1390	185/60R14
VP2	2460	1477	1445	205/50R15
VP3	2700	1470	1470	195/65R15
VP4	3050	1670	1670	LT245/75R16

Previo a las pruebas de pesaje dinámico, cada uno de los vehículos fue sometido a un pesaje estático para determinar la carga soportada por cada una de las llantas, la cual fue registrada como valor de referencia. En este contexto, el primer vehículo fue sometido a 5 pesajes por llanta, cuyos valores se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2
Masa [kg] obtenida del pesaje estático para el vehículo VP1.

Evento	Llanta d _i	Llanta t _i	Llanta d _d	Llanta t _d
1	318	235	336	214
2	333	243	341	211
3	321	234	318	215
4	333	233	329	209
5	326	226	320	206
Promedio	326	234	329	211
Máx desv.	2,5%	3,5%	3,8%	2,2%

Esta tabla permite estimar que la máxima desviación con respecto al promedio es del 3,8%, que representa una máxima diferencia de 12 kg. Los valores promedio de masa soportada por cada una de las llantas de los vehículos de prueba se indican en la Tabla 5.3, en tanto que en la Figura 5.10 se muestran algunos aspectos del pesaje estático realizado.

Tabla 5.3
Distribución promedio de la masa [kg] en los vehículos de prueba.

Vehículo	Llanta d _i	Llanta t _i	Llanta d _d	Llanta t _d	Masa Total	Relación d _i /t _i	Relación d _d /t _d
VP1	326	234	329	211	1100	1,39	1,56
VP2	360	239	342	213	1154	1,51	1,61
VP3	370	303	333	296	1302	1,22	1,13
VP4	365	370	373	369	1477	0,99	1,01



Figura 5.10
Pesaje estático por llanta con el prototipo.

5.4.2 Zona de prueba

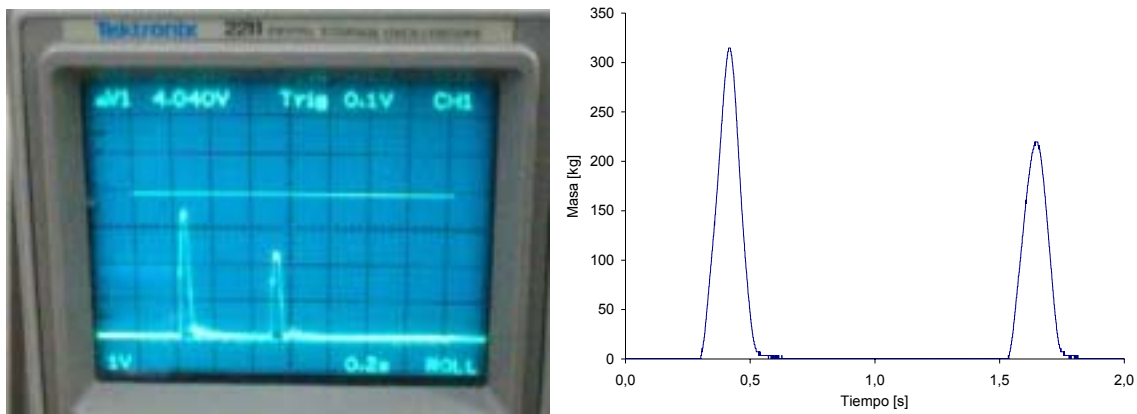
La fuerza vertical transmitida al piso por un vehículo, debida a la acción de la gravedad, corresponde a su peso. Sin embargo, cuando el vehículo está en movimiento, la fuerza transmitida es afectada, entre otras cosas, por el tipo de suspensión, siendo comúnmente diferente al peso estático. A su vez, la superficie del piso es una variable de entrada que participa en la excitación del movimiento del sistema de suspensión. Una recomendación para realizar el pesaje en movimiento es el de preparar la superficie de rodamiento para disminuir este tipo de efectos; no obstante, en este caso la zona de pruebas tenía un piso rígido compuesto por losas cuadradas de concreto hidráulico de 2,5 m por lado y de 3 mm a 5 mm de separación con losas adyacentes. Para mantener el prototipo protegido de los cambios ambientales, así como para facilitar la alimentación eléctrica de los dispositivos de medición y otros accesorios, para la zona de pruebas se seleccionó un espacio techado, dentro de una nave tipo industrial.

En estas condiciones y considerando el espacio disponible, se estimó que los vehículos alcanzarían una velocidad máxima de prueba alrededor de los 25 km/h, considerada suficiente para los fines del dispositivo. De esta manera, se propusieron dos intervalos de velocidades de prueba, clasificándose como velocidad baja (0 a 10 km/h) y velocidad alta (mayor a 10 km/h).

5.4.3 Ejecución de pruebas

Con los vehículos, la zona y el equipo de medición preparados, se realizaron las pruebas haciendo transitar los vehículos sobre el dispositivo a diferentes velocidades, tratando de mantener la velocidad del vehículo constante en cada evento. Estimando teóricamente que la velocidad más alta esperada era de 30 km/h, la permanencia de la llanta sobre la plataforma del dispositivo sería de sólo 0,025 s, por lo que la frecuencia equivalente sería de 40 Hz. Por esta razón, se seleccionó un esquema de filtrado de hasta 100 Hz (filtro pasabajas) en el sistema acondicionador de señal 2210.

Para cada evento de prueba, las llantas del mismo lado del vehículo pasaron sobre el prototipo, siendo registrados los datos de la historia del voltaje a través del osciloscopio y procesados para obtener la masa sobre el dispositivo, como se muestra en la Figura 5.11. En esta representación gráfica, cada “pico” representa el paso de una llanta, correspondiendo el primero a la delantera y el segundo a la trasera. Posteriormente, los datos adquiridos de esta manera fueron transmitidos del osciloscopio a una computadora, en donde fueron procesados para obtener el peso y la masa equivalente al paso sobre el dispositivo de pesaje.

**Figura 5.11**

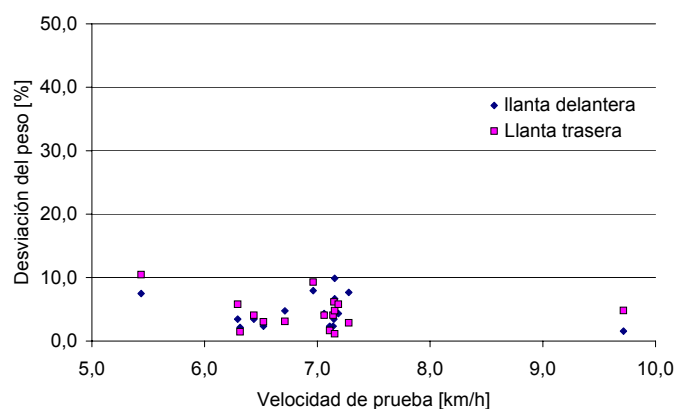
Señal adquirida con el osciloscopio y gráfica de datos procesada.

Teniendo este registro en el que se identifica la acción de cada llanta, se calculó el tiempo de paso entre ellas que, combinado con la distancia base entre ejes del vehículo, permitió estimar su velocidad de prueba con mayor precisión.

5.5 Resultados de pruebas

5.5.1 Resultados principales

Los resultados de las pruebas del paso de los vehículos sobre la plataforma de pesaje, se muestran gráficamente en las figuras siguientes. Para ello, se muestran en dos partes, correspondiendo la primera a los vehículos VP1 y VP2, considerados como compactos, mientras que en la segunda se presentan los relacionados a los vehículos VP3 y VP4, considerados de mayor capacidad (minivan y pick up). La primera parte se muestra en la Figura 5.12, en la que se observa la desviación porcentual presentada entre el valor del peso registrado por el dispositivo de pesaje con respecto al peso estático en cada llanta.

**Figura 5.12**

Desviación absoluta del peso real para vehículos VP1 y VP2 con velocidades menores a 10 km/h.

La gráfica presenta desviaciones tanto para la llanta delantera como para la llanta trasera, cuando los vehículos circulaban a velocidades menores a 10 km/h. En ambos casos, la desviación es menor al 10%, salvo en uno de los eventos, que es ligeramente mayor.

En la Figura 5.13 se muestran los resultados obtenidos para estos mismos vehículos, pero circulando a velocidades mayores a 10 km/h. En este caso, la dispersión de los datos es mucho mayor, tanto para la llanta delantera como la trasera, respecto a su correspondiente peso estático.

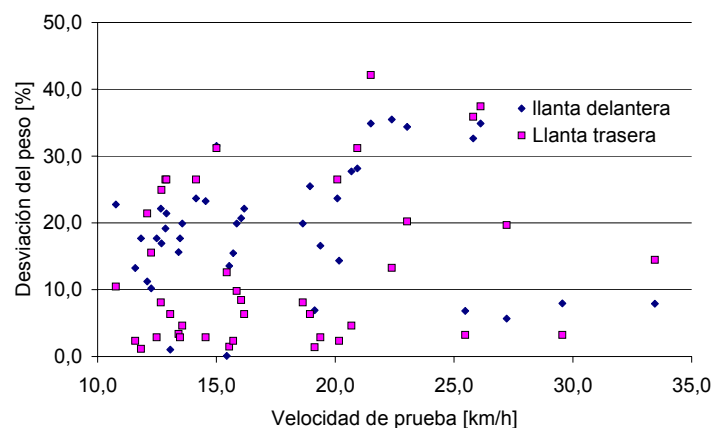


Figura 5.13

Desviación absoluta del peso real para vehículos VP1 y VP2 con velocidades mayores a 10 km/h.

Con respecto a la proporción del peso soportado por la llanta delantera entre el soportado por la llanta trasera de un mismo lado, llamada d/t , se obtuvo un comportamiento similar para velocidades menores a 10 km/h con los vehículos compactos, como se muestra en la figura 5.14.

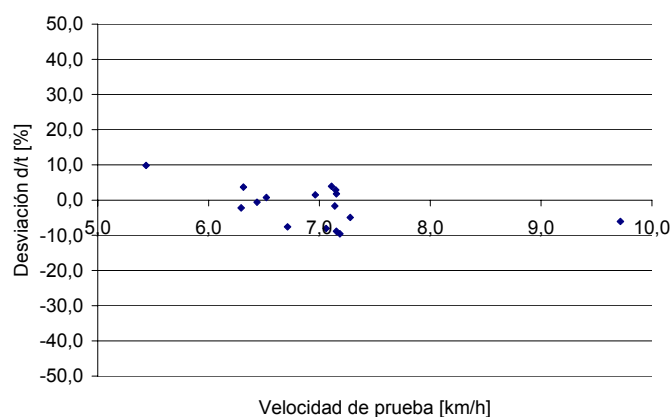


Figura 5.14

Desviación de la relación entre la llanta delantera y la llanta trasera registrados dinámicamente, para VP1 y VP2 con velocidades menores a 10 km/h.

En la figura se observa que las diferencias entre las relaciones medidas con las reales, se mantienen dentro del 10% para ese intervalo de velocidades. Para velocidades mayores a los 10 km/h, las diferencias en la relación de la distribución de pesos descrita son en muchos eventos mayores al 10%, como se muestra en la Figura 5.15. Sin embargo, esta relación de pesos presenta una menor desviación, comparada con las desviaciones de los pesos en cada llanta (Figura 5.13).

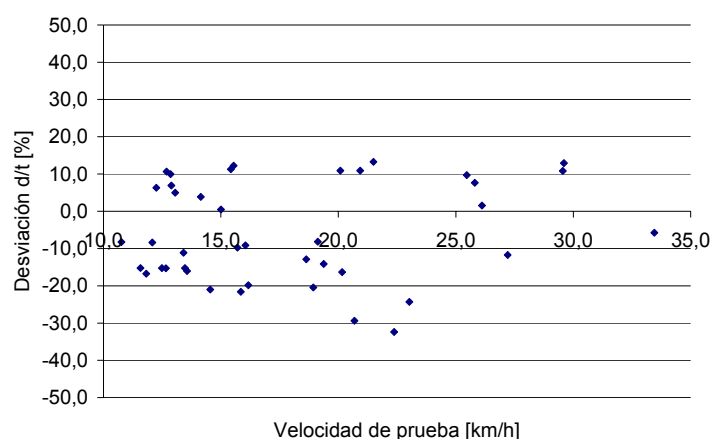


Figura 5.15

Desviación de la relación entre la llanta delantera y la llanta trasera registrados con la real, para VP1 y VP2 con velocidades mayores a 10 km/h.

Las pruebas realizadas con los vehículos VP3 y VP4, de mayor capacidad que los compactos, muestran que la desviación absoluta del peso real en el intervalo de velocidades de hasta 20 km/h (con estos vehículos no pudo alcanzarse una velocidad mayor), se extiende hasta poco más del 60%. Sin embargo, puede notarse que las mayores desviaciones se dieron para la llanta trasera, siendo menores para la primera llanta. Este hecho puede asociarse con algunos aspectos relacionados con el tamaño de la llanta y con los accesorios que rodeaban el dispositivo de pesaje, como se comenta más adelante.

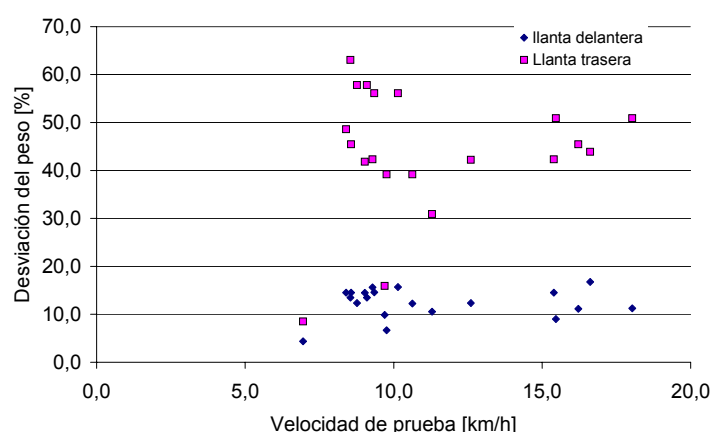


Figura 5.16

Desviación absoluta del peso real para vehículos VP3 y VP4 en el intervalo de velocidades probadas.

Así, estas desviaciones provocaron a su vez desviaciones en la relación d/t , ya descrita, lo cual se muestra en la Figura 5.17, siendo en la mayoría de los eventos menor al 20%.

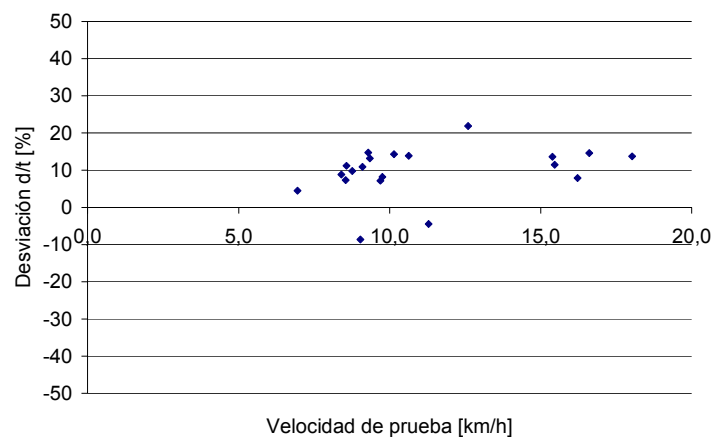


Figura 5.17
Desviación de la relación entre la llanta delantera y la llanta trasera registrados con la real para los vehículos VP3 y VP4, en el intervalo de velocidades probadas.

Las gráficas anteriores representan los resultados de las pruebas efectuadas dinámicamente, es decir, con los vehículos en movimiento. En términos generales, se observa un comportamiento previsto del dispositivo para vehículos ligeros. Sin embargo, estos límites fueron sobrepasados para velocidades altas y en general para cualquier velocidad con vehículos de mayor capacidad. Lo anterior, da pauta para mejoras futuras del prototipo, tanto en la parte mecánica como en la parte de instrumentación.

5.5.2 Discusión

Un principal punto de discusión corresponde a la deflexión alcanzada por la placa. Como se muestra en la Figura 5.18, la deflexión sufrida por el dispositivo cuando los vehículos eran pesados estáticamente, era mayor a 1 cm. Con esta deflexión, las partes delantera y trasera de la llanta sobre el dispositivo de pesaje quedaban muy cerca de las piezas de madera colocadas al frente y atrás del dispositivo, pudiendo llegar a tocarse, llanta y madera, en algunos casos.

**Figura 5.18**

Deflexión alcanzada por el dispositivo durante el pesaje estático.

Este hecho era más patente en los vehículos de mayor capacidad, puesto que las llantas tenían una mayor superficie de contacto con la plataforma superior del dispositivo. Así mismo, durante el paso de la llanta por el mismo, como se observa de los resultados obtenidos, la deflexión del transductor de peso ocasionaba una alteración del movimiento, puesto que el momentum lineal siempre era dirigido hacia el frente. Esta misma deflexión produjo que los elementos de restricción del movimiento vertical de la plataforma superior (topes de fijación) se desplazaran y obstruyeran la recuperación vertical de la plataforma superior, interviniendo en el proceso normal de recuperación de las vigas del dispositivo a su posición original.

Aunque el material utilizado permite aprovechar su gran capacidad de deformación, la deflexión experimentada por el duraluminio 6061-T6 retrasa su capacidad de respuesta, por lo que es más sensible a altas velocidades. Lo anterior no descarta la posibilidad de utilizar otros tipos de aluminio con mayor rigidez, aceros o algún otro material. Para bajas velocidades el aluminio parece tener un buen comportamiento, por lo que algunos cambios mínimos en el diseño y en el acondicionamiento del sitio de prueba podrían incrementar la capacidad a mayores velocidades.

Como se dijo previamente, la cavidad utilizada para la instalación del prototipo fue acondicionada utilizando madera para rellenar los espacios antes y después del prototipo. Esto parece ser una desventaja a velocidades mayores a 10 km/h, ya que la madera presentaba una tendencia a ser levantada por la llanta durante su paso y saliendo, por tanto, de su lugar de fijación. Consecuentemente, se afectaba la fuerza de la llanta sobre el dispositivo de pesaje, provocando que el prototipo no registrara la carga de la llanta en una forma total al apoyarse ésta parcialmente sobre la madera.

Con respecto a la trayectoria de paso, durante todas las pruebas realizadas no se condicionó el paso de la llanta sobre una zona especial de la placa superior del prototipo, con lo que se pretendió mostrar la inmunidad del dispositivo a esta variable.

Otro aspecto que debe ser comentado es que los elementos utilizados para transmitir la fuerza aplicada en la placa superior hacia las vigas en cantilibre, presentaban una superficie plana de contacto, generando en ocasiones que se incrustara ligeramente y no se presentara un movimiento relativo de deslizamiento entre la placa superior y estos elementos. Este efecto puede mejorarse redondeando la superficie de este elemento para que la placa superior “ruede” sobre estos apoyos y transmitan la fuerza en una sola línea de contacto. Para mejorar este diseño se sugiere que en lugar de utilizar ángulo de aluminio, se utilice un material de mayor resistencia al impacto y al desgaste, proponiendo un perfil redondo que garantice mayor continuidad del contacto con la placa superior.

Dado que el prototipo desarrollado es para vehículos ligeros, el ancho de la placa soporte aloja perfectamente llantas de un diámetro pequeño. Sin embargo, se requiere una mayor área de apoyo para llantas de diámetros mayores, que sufren mayor deformación al soportar el peso de un vehículo mayor.

Conclusiones

De los puntos propuestos en el objetivo inicial de este trabajo, resaltan las siguientes consideraciones:

Estáticamente, el dispositivo mostró un excelente comportamiento mecánico, a pesar de la magnitud de la deflexión alcanzada por las cargas aplicadas. La medición del peso estático, dentro del intervalo de carga del diseño del dispositivo, resulta confiable.

La instrumentación utilizada presenta ventajas en la facilidad de instalación, además del bajo costo inherente en su construcción. Debido al tipo de aplicación, es recomendable el uso de extensómetros del tipo dinámico, aunque en estos dispositivos se pueden evaluar otras galgas de características diferentes, dadas las condiciones requeridas en el empleo de estos dispositivos de pesaje.

El dispositivo tiene un comportamiento apropiado, de acuerdo con los alcances del trabajo, para vehículos ligeros circulando a velocidades de hasta 10 km/h. Sin embargo, su aplicación a mayores velocidades y con vehículos de mayor peso y dimensiones requieren de la solución de aspectos relacionados con el diseño del prototipo y de los materiales empleados. Aunque el prototipo es capaz de soportar mayores pesos que los propuestos en este trabajo, su desempeño en pesaje dinámico no es adecuado para vehículos con masa mayor a 1200 kg.

Recomendaciones

Dado que del desarrollo de este trabajo surgen cuestionamientos sobre mejorar la exactitud de los datos obtenidos, mejorar las condiciones del sitio de prueba utilizado, incrementar la velocidad máxima del vehículo en el prototipo, así como del cumplimiento de normas tales como la ASTM E1318-94, se requiere realizar trabajo futuros que ataquen estas situaciones detectadas. Por ello, se comenta lo siguiente:

Se identifica que las características geométricas del sitio de prueba tienen una gran importancia en el comportamiento del vehículo y, por tanto, en la exactitud de los resultados obtenidos. Aunando a lo anterior, el efecto del tipo de suspensión de cada vehículo también afecta las mediciones que pueden realizarse con un dispositivo de este tipo, el cual puede variar ampliamente en su rigidez. Lo más deseable es contar con una superficie que cumpla con los requisitos propuestos en normas como la ASTM E1318-94 "*Standard Specification for Highway Weigh in Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method*", ya que la excitación del vehículo previa al paso sobre el prototipo sería mínima, evitando así que las lecturas se alejen del intervalo deseado del 10% respecto de su peso estático. El hecho de que las lecturas obtenidas en algunas de las pruebas hayan sobrepasado desviaciones mayores al 10%, muestra el efecto que tiene un

vehículo al pasar por un camino dañado, es decir que la aplicación de la carga sobre el pavimento es mayor, disminuyendo así su vida útil.

La velocidad máxima del vehículo desarrollada durante las pruebas no excedió los 25 km/h, debido no sólo al espacio disponible, sino también a las condiciones del sitio. Mejorar los espacios de prueba requieren de una inversión mayor, no considerada en el alcance de este trabajo, pero si estudiada y sugerida para el desarrollo de trabajos futuros. No obstante queda probada su aplicación para evaluar la carga dinámica total, es decir, la componente estática más el efecto dinámico, para ser considerado en el desarrollo de las redes carreteras.

La norma ASTM E1318-94 fue utilizada como referencia en este trabajo, para tener en cuenta las consideraciones básicas en el desarrollo de sistemas de pesaje. El prototipo desarrollado no puede ser considerado como un sistema en su totalidad, por no contemplar la automatización de la medición y manejo implícito de la señal producida por el dispositivo. Asimismo, el sitio de prueba no fue construido según las recomendaciones en la norma comentada en este escrito, aprovechando las condiciones naturales de una zona ya construida. La finalidad del presente estudio fue validar el concepto, por lo que lo anterior debe ser tomado en cuenta para trabajos futuros.

Los resultados obtenidos demuestran que el dispositivo es de utilidad para la realización de un pesaje estático y para un pesaje dinámico a baja velocidad. Sin embargo, es menester trabajar sobre los detalles detectados durante la evolución de este estudio para obtener dispositivos con mayores capacidades y mejor desempeño práctico.

Referencias

1. Ervin, R. D.; Nisonger, R.L.; Suyers, M.; Gillespie, T.D.; Fancher, P.S. "Influence of Size and Weight Variables on the Stability and Control Properties of Heavy Trucks", Final Report, UMTRI-83-10-2, Vol. II. University of Michigan Transportation Research Institute. 1983.
2. Mendoza Díaz, A.; Cadena Rodríguez, A. "Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos que Circulan sobre las Carreteras Mexicanas", Documento Técnico No. 8. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México. 1992.
3. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Autotransporte Federal. "Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal", publicado en Enero de 1994 y modificado conforme al decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de Mayo de 1996.
4. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Autotransporte Federal. "Procedimiento del Operativo para la Verificación del Peso y dimensiones de los Vehículos que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal". Agosto de 1997.
5. Organization for Economic Co-operation and Development. "Dynamic Interaction of Heavy Vehicles with Road and Bridges". OECD DIVINE Programme. Final Report. 1997.
6. Cebon, D. "Interaction between Heavy Vehicles and Roads" SAE paper SP-951. Warrendale, PA, USA. 1993.
7. Sweatman, P.F. "A Study of Dynamic Wheel Forces in Axle Group Suspensions of Heavy Vehicles". Special Report SR27. Australian Road Research Board. 1983.
8. Kalisch, H.; Paatz, B. "20 Years of Weigh in Motion (WIM) in Germany". Post Proceedings English Version. First European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. Zürich, March 8-10 1995. Pp 99-106.
9. Koniditsiotis, C. "Australian Weigh in Motion Technology". Post Proceedings English Version. First European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. Zürich, March 8-10 1995. Pp 91-98.
10. American Society for Testing and Materials. "Highway Weigh-in-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Method" (ASTM E1318-94). 1994.
11. Cunagin, W. D. "Use of Weigh-in-Motion Systems for Data Collection and Enforcement" Synthesis of Highway Practice 124. National Cooperative

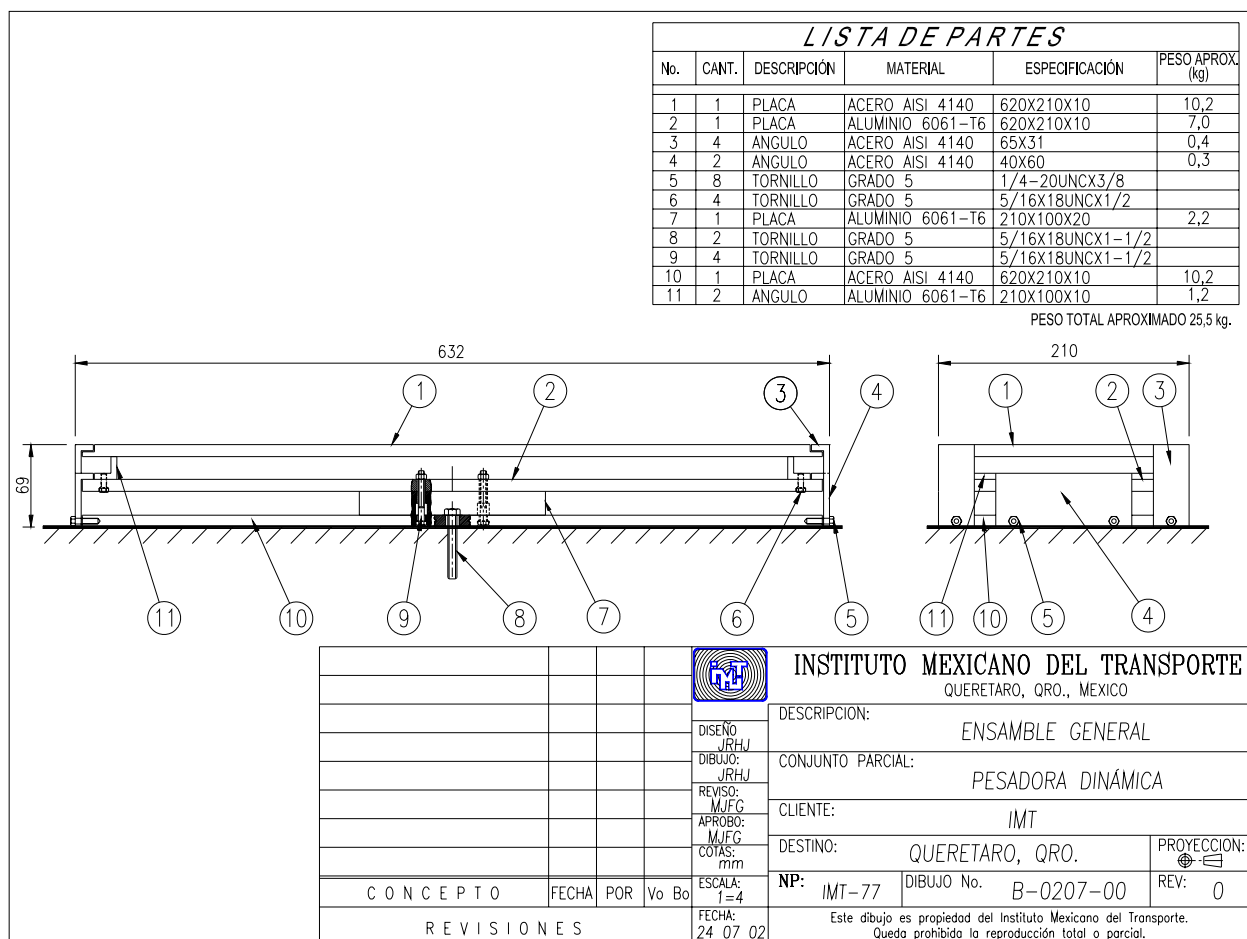
- Highway Research Program (NCHRP). Transportation Research Board, National Research Council. Washington, USA. 1986.
12. Arizona Department of Transportation "Port of Entry Weigh in Motion Feasibility Study" U.S Department of Transportation Federal highway Administration. Final report March 1989.
 13. Golden River "Weigh in Motion System for Vehicle Weight Data Collection and Enforcement" Golden River Traffic Ltd., Churchil Road, Bicester, Oxon OX6 7XT England. 1990.
 14. Transport Research Laboratory "Multiple Sensor Weigh-in Motion Trials at Abingdon A34" Research report 375. USA. 1993.
 15. Instruction Manual "Model P-3500 Digital Strain Indicator". Instruments Division, Measurements Group, Inc. North Carolina, USA. 1983.
 16. Instruction Manual "2200 System - Signal Conditioning System". Model 2210. Instruments Division, Measurements Group, Inc. North Carolina, USA. 1988.
 17. Operators Manual "Oscilloscope 2211" Tektronix United Kingdom, Ltd., Marlow, first printing december 1988.
 18. Hannah, R. L.; Reed, S. E. "Strain Gage" Users' handbook, Elsevier Applied Science, London and New York Society for experimental mechanics, Inc. 1992.
 19. Dally, J. W.; Riley, W. F. "Experimental Stress Analysis" Second Edition, international Student Edition, McGraw-Hill Book Company. Singapore 1978.
 20. Egor P. Popov, Toader A. Balan, "Mecánica de Sólidos", Segunda Edición. Pearson Educación. México, 2000.
 21. Cunagin, W. D.; Majdi, S. O.; Yeom, H. Y. "Intelligent Weigh-in-Motion Systems". Transportation Research Record 1311 Pavement Design, Management and Performance – Pavement Management: Data Collection, Analysis, and Storage. Transportation Research Board Council. 1991. Pp 88-91.

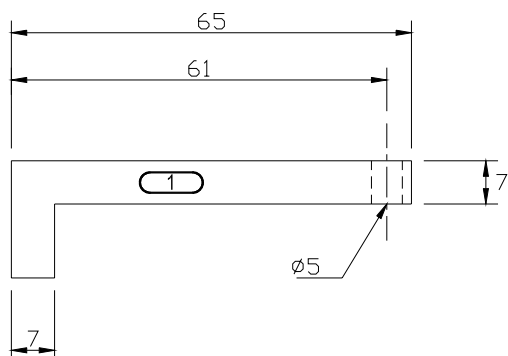
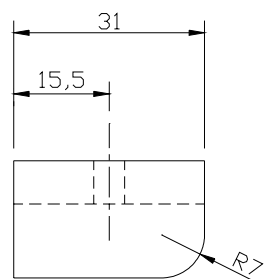
Anexos

Relación de planos del prototipo desarrollado.

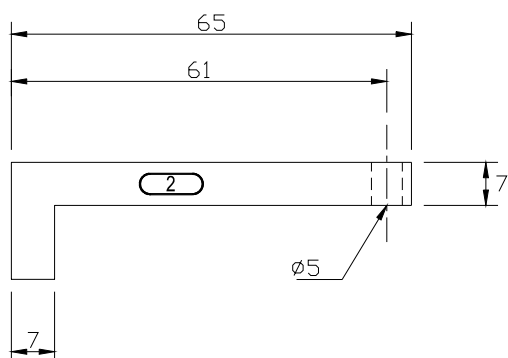
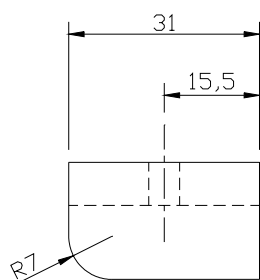
Clave de identificación	Descripción general
B-0207-00	Plano general
A-0207-01	Tope para fijar placa superior
A-0207-02	Tope para fijar placa en voladizo
A-0207-03	Placa base
A-0207-04	Placa en voladizo
A-0207-05	Angulo
A-0207-06	Espaciador
A-0207-07	Placa superior

A continuación se presentan los planos en escala reducida.





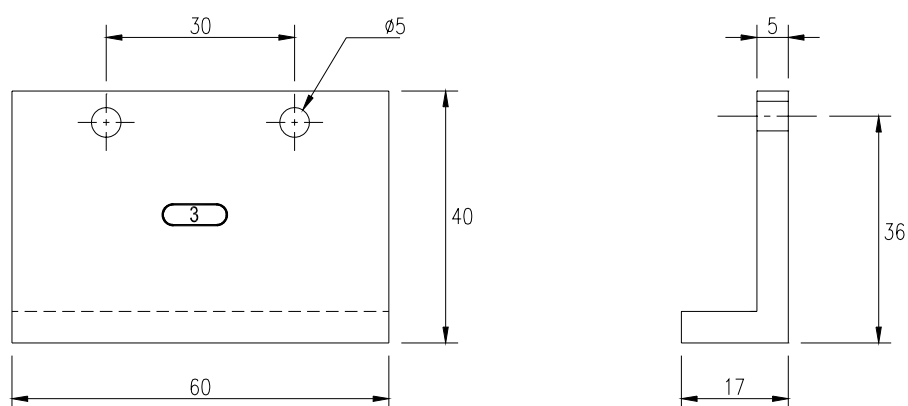
TOPE SUPERIOR TIPO 1
SE REQUIEREN 2 PIEZAS



TOPE SUPERIOR TIPO 2
SE REQUIEREN 2 PIEZAS

MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A-36
TOLERANCIAS GENERALES $\pm 0,1$ mm

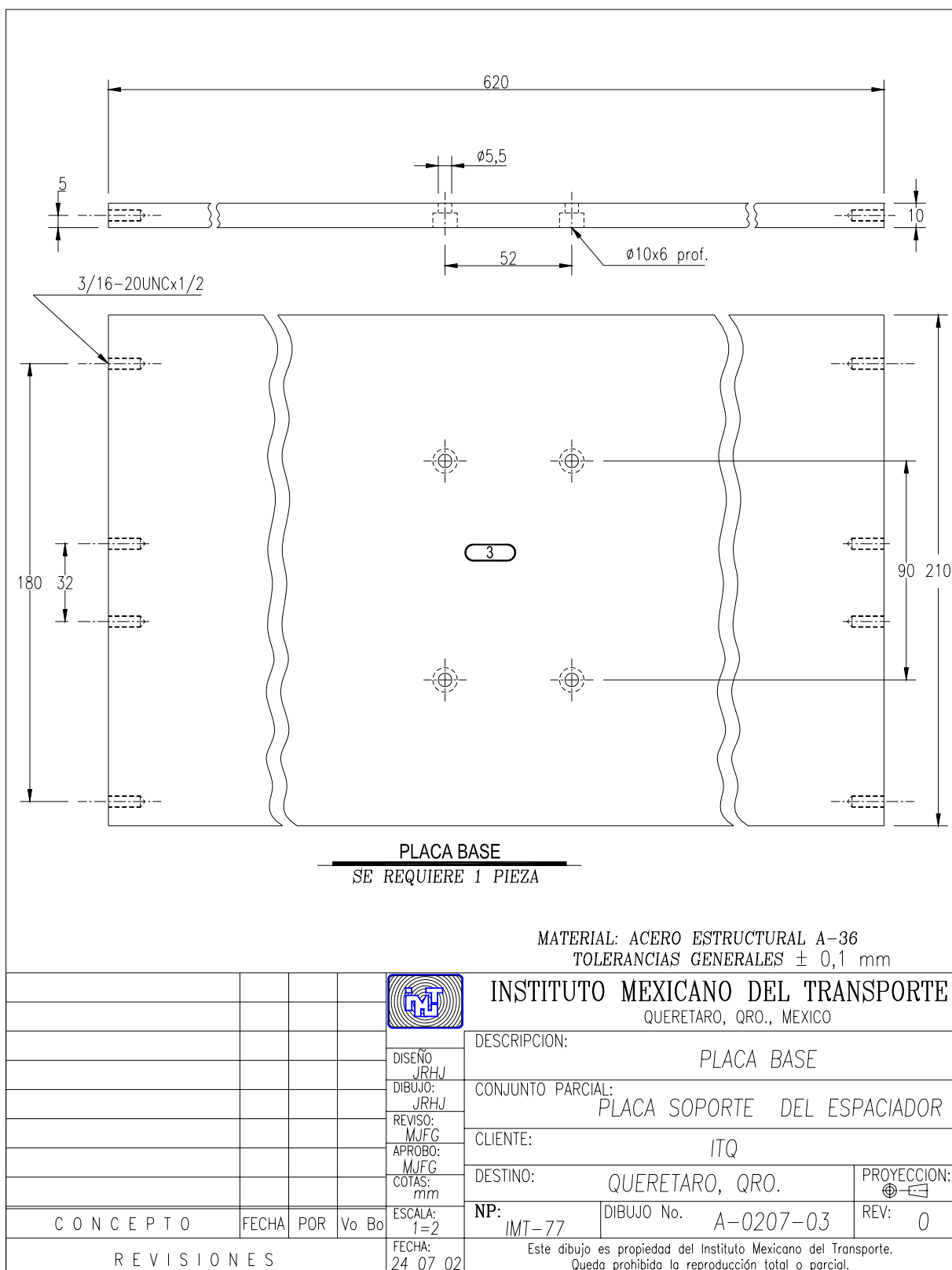
					INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE		
					QUERETARO, QRO., MEXICO		
				DISEÑO JRHH	DESCRIPCION: TOPE PARA FIJAR PLACA SUPERIOR		
				DIBUJO: JRHH	CONJUNTO PARCIAL: TOPE EN ANGULO		
				REVISO: MJFG	CLIENTE: ITQ		
				APROBO: MJFG	DESTINO: QUERETARO, QRO.		PROYECCION: 
				COTAS: mm	NP: IMT-77	DIBUJO No. A-0207-01	REV: 0
C O N C E P T O				FECHA	Este dibujo es propiedad del Instituto Mexicano del Transporte. Queda prohibida la reproducción total o parcial.		
R E V I S I O N E S				Vo Bo			
				ESCALA: 1=1			
				FECHA: 24 07 02			

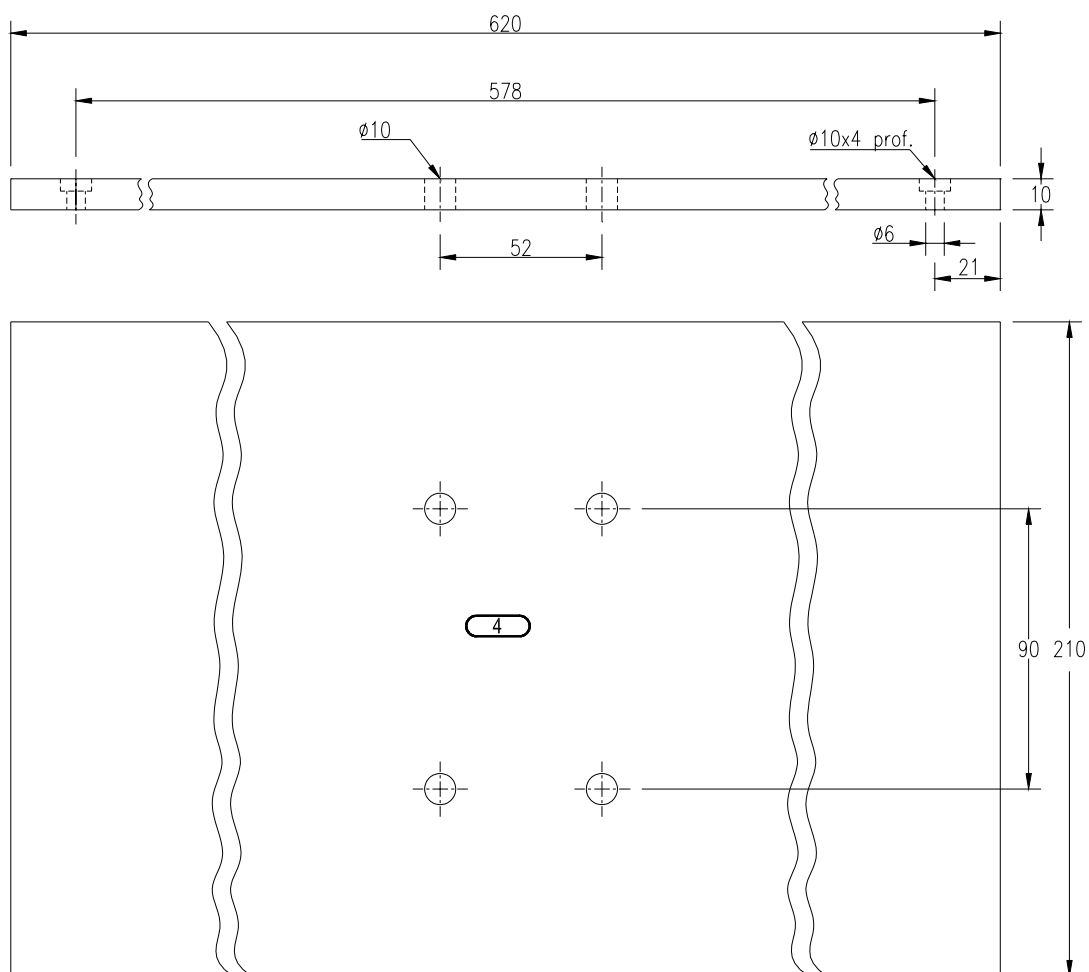


TOPE INFERIOR
SE REQUIEREN 2 PIEZAS

MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A-36
TOLERANCIAS GENERALES $\pm 0,1$ mm

					INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE		
					QUERETARO, QRO., MEXICO		
					DESCRIPCION:	TOPE PARA FIJAR PLACA EN VOLADIZO	
					CONJUNTO PARCIAL:	ANGULO DE TOPE INFERIOR	
					CLIENTE:	ITQ	
				DISEÑO: JRHJ	DESTINO:	QUERETARO, QRO.	PROYECCION:
				DIBUJO: JRHJ			
				REVISO: MJFG			
				APROBO: MJFG			
				COTAS: mm			
				ESCALA: 1=1	NP: IMT-77	DIBUJO No. A-0207-02	REV: 0
C O N C E P T O				FECHA: 24 07 02	Este dibujo es propiedad del Instituto Mexicano del Transporte. Queda prohibida la reproducción total o parcial.		
R E V I S I O N E S							

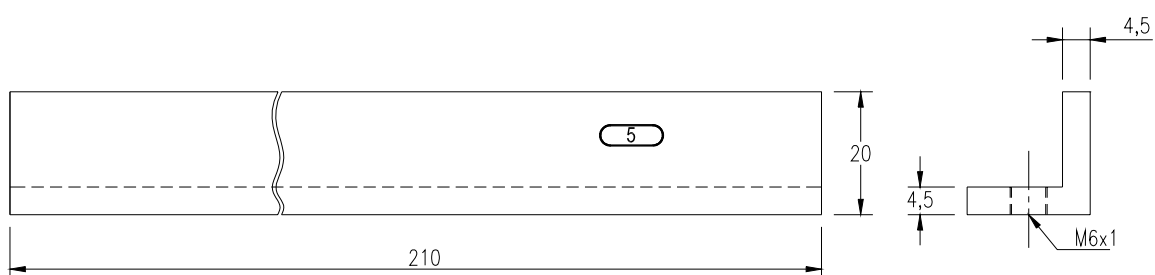




PLACA EN VOLADIZO
SE REQUIERE 1 PIEZA

MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A-36
TOLERANCIAS GENERALES $\pm 0,1$ mm

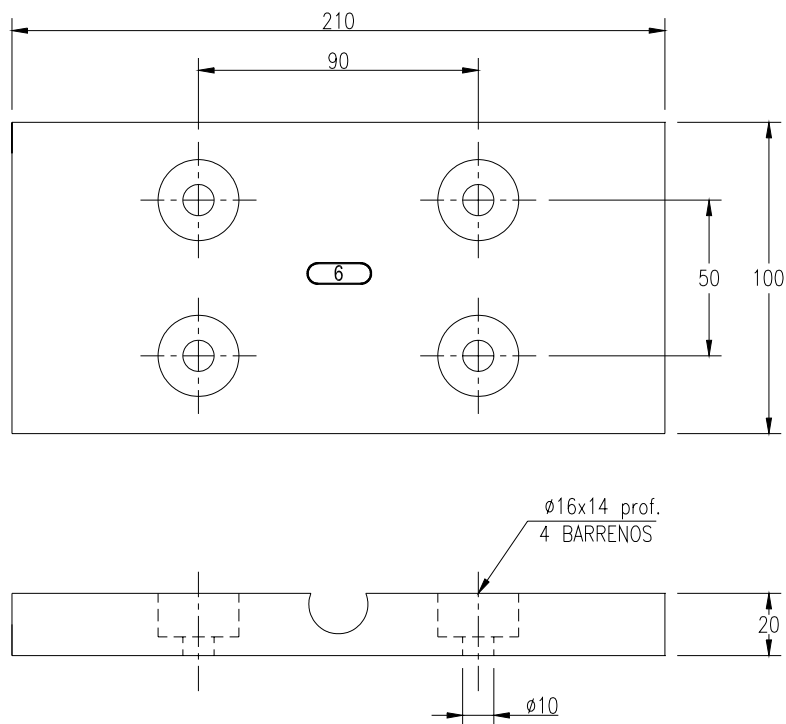
					INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE QUERETARO, QRO., MEXICO	
					DESCRIPCION:	PLACA EN VOLADIZO
				DISEÑO JRHH	CONJUNTO PARCIAL:	PLACA INSTRUMENTADA
				DIBUJO: JRHH	CLIENTE:	ITQ
				REVISO: MJFG	DESTINO:	QUERETARO, QRO.
				APROBO: MJFG	PROYECCION:	
				COTAS: mm	NP:	IMT-77
				ESCALA: 1=2	DIBUJO No.	A-0207-04
				FECHA: 24 07 02	REV:	0
REVISIONES				Este dibujo es propiedad del Instituto Mexicano del Transporte. Queda prohibida la reproducción total o parcial.		



ESPACIADORES
SE REQUIEREN 2 PIEZAS

MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6
TOLERANCIAS GENERALES $\pm 0,1$ mm

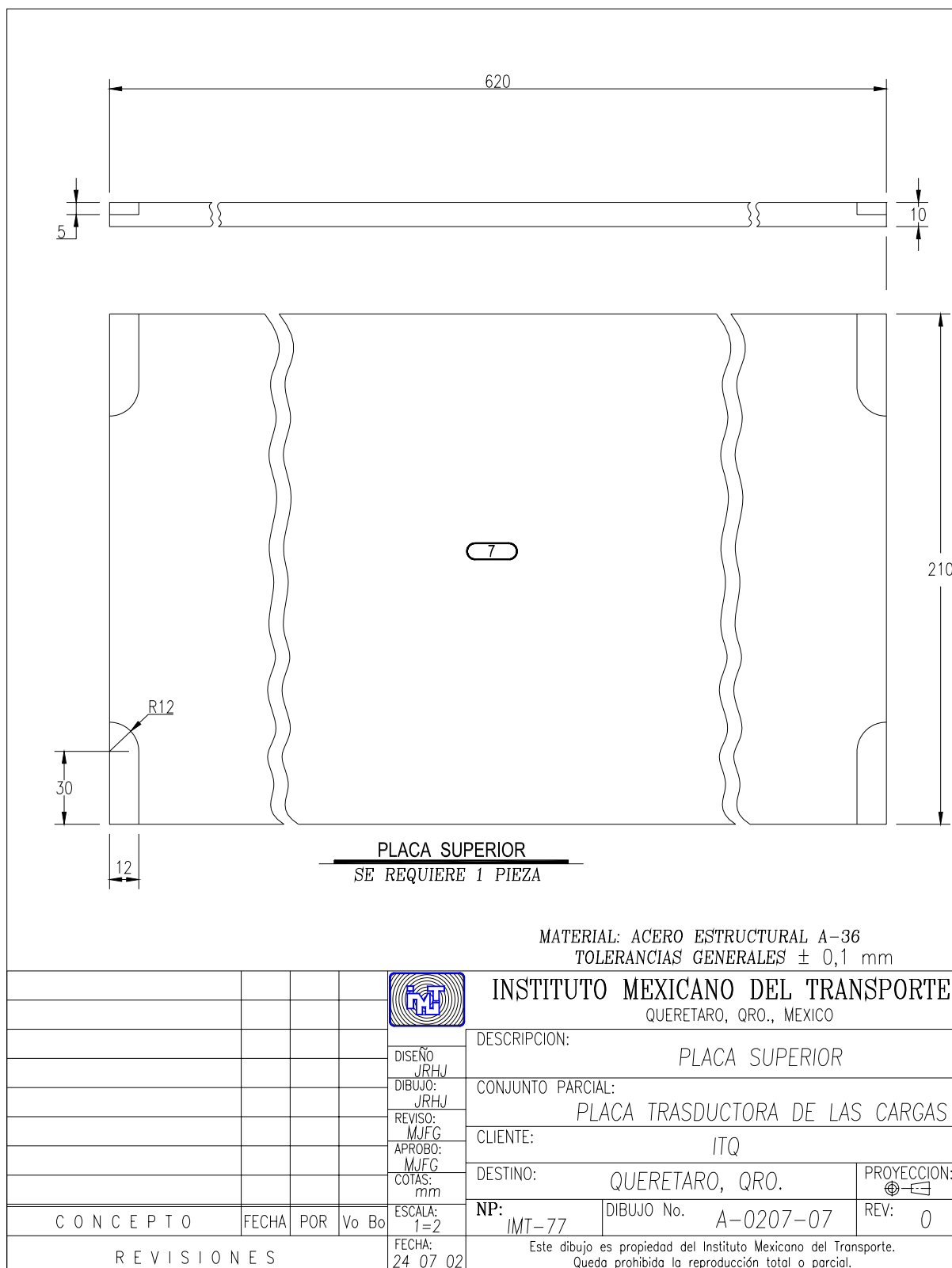
					INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE QUERETARO, QRO., MEXICO		
					DESCRIPCION: ESPACIADOR		
				DISEÑO: JRHJ	CONJUNTO PARCIAL: ANGULO FIJO A PLACA EN CANTILIVER		
				DIBUJO: JRHJ	CLIENTE: ITQ		
				REVISO: MJFG	DESTINO: QUERETARO, QRO.		PROYECCION: 
				APROBO: MJFG	NP: MT-77		DIBUJO No. A-0207-05
				COTAS: mm			REV: 0
C O N C E P T O	FECHA	POR	Vo Bo	ESCALA: 1=1	Este dibujo es propiedad del Instituto Mexicano del Transporte. Queda prohibida la reproducción total o parcial.		
R E V I S I O N E S				FECHA: 24 07 02			



APOYO DE PLACA EN VOLADIZO
SE REQUIERE 1 PIEZA

MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6
TOLERANCIAS GENERALES $\pm 0,1$ mm

					INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE QUERETARO, QRO., MEXICO	
					DESCRIPCION:	ESPACIADOR
				DISEÑO JRHH	CONJUNTO PARCIAL:	ANGULO FIJO A PLACA EN CANTILIVER
				DIBUJO: JRHH	CLIENTE:	ITQ
				REVISO: MJFG	DESTINO:	QUERETARO, QRO.
				APROBO: MJFG	PROYECCION:	
				COTAS: mm	NP: IMT-77	DIBUJO No. A-0207-06
CONCEPTO	FECHA	POR	Vo Bo	ESCALA: 1=2	REV: 0	
REVISIONES				FECHA: 24 07 02	Este dibujo es propiedad del Instituto Mexicano del Transporte. Queda prohibida la reproducción total o parcial.	



**CIUDAD DE MÉXICO**

Av. Patriotismo 683

Col. Mixcoac

03730 México, D. F.

Tel (55) 5615 3575

5598 5218

Fax (55) 5598 6457

SANFANDILA

Km 12+000, Carretera

Querétaro – Galindo

76700 Sanfandila, Qro.

Tel (442) 216 97 77

216 96 46

Fax (442) 216 96 71

**Internet <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx**