

ASPECTOS DE LA DINAMICA DE VEHICULOS PESADOS Y SU RELACION CON EL DAÑO A PAVIMENTOS

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

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

**Aspectos de la dinámica de vehículos
pesados y su relación con el daño a
pavimentos**

**Publicación Técnica No. 119
Sanfandila, Qro., 1999**

Presentación

Este documento fue elaborado por Alejandro Lozano Guzmán, José Antonio Romero Navarrete, José Ricardo Hernández Jiménez, Francisco Carrión Viramontes y David Vázquez Vega.

Se contó con el apoyo del Coordinador de Equipamiento para el Transporte, Dr. Miguel Martínez Madrid, para la publicación de este trabajo.

Indice

	<i>Página</i>
Resumen.	V
Abstract.	VII
Resumen ejecutivo.	IX
1. Introducción.	1
2. Respuesta dinámica de la suspensión de vehículos pesados y su relación con el daño potencial a carreteras.	3
2.1 Introducción.	3
2.2 Nomenclatura.	4
2.3 Descripción de los modelos matemáticos.	7
2.4 Método de solución.	10
2.5 Programa de computadora.	13
2.6 Conclusiones.	18
2.7 Referencias.	19
3. Vehículos pesados, modelado de la interacción viscoelástica llanta-suspensión-pavimento.	21
3.1 Introducción.	21
3.2 Modelo matemático.	22
3.3 Procedimiento de solución.	24
3.4 Realización de las pruebas.	25
3.5 Conclusiones.	31

3.6	Referencias.	32
4.	Evaluación experimental de la interacción de vehículos pesados con el pavimento en México.	35
4.1	Introducción.	35
4.2	Evaluación experimental.	36
4.2.1	Medición de la deformación dinámica de tanques ante diferentes condiciones de rugosidad del pavimento.	36
4.2.2	Medición de la deformación dinámica de una plataforma como función de la velocidad.	38
4.2.3	Comparación del nivel de vibración en un vehículo equipado con diferentes tipos de suspensión.	40
4.2.4	Variación del nivel de vibración con la velocidad.	41
4.2.5	Medición del nivel de impacto sobre el pavimento como función de la velocidad.	42
4.2.6	Nivel de impacto sobre el pavimento respecto al tipo de suspensión.	45
4.3	Discusión de resultados.	46
4.4	Conclusiones.	47
4.5	Referencias.	48
5.	Interacción vehículo pesado-pavimento. Potencial de ahorro en el deterioro de las carreteras por efecto de la carga dinámica de vehículos pesados.	49
5.1	La infraestructura carretera de México.	49
5.2	Interacción vehículo pesado-pavimento.	53
5.3	Impacto global de la interacción vehículo pesado-pavimento en el deterioro de la red carretera mexicana.	58
5.4	Conclusiones.	59
5.5	Referencias.	60

Resumen

La importancia del estudio de la interacción vehículo pesado - pavimento se deriva de los costos involucrados en la conservación de la red carretera y en aquellos asociados al mantenimiento de los vehículos, producto de su desgaste al circular por pavimentos en mal estado. De esta manera existe una preocupación mundial por conocer los aspectos más importantes que afectan esta interacción. Al respecto, este trabajo presenta los resultados de aproximaciones teóricas y experimentales asociadas a la interacción vehículo pesado - pavimento, que permiten identificar el efecto que tanto factores asociados a los vehículos como a los pavimentos, tienen sobre los niveles de deterioro de la red. Con base en estos estudios, se presentan esquemas amigables para el uso de la infraestructura, mismos que pudieran redituar en ahorros en el deterioro de los pavimentos. En los trabajos que se presentan, se introduce un modelo conceptual en el que la energía de deformación almacenada en el pavimento se considera asociada al deterioro del mismo, desarrollando los modelos matemáticos que permiten obtener la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento. Los modelos se dedujeron con base en la aplicación de un enfoque Newtoniano y los sistemas de ecuaciones lineales resultantes, se resuelven mediante la aplicación del Método de las Matrices de Transición. A partir de los modelos desarrollados, se analiza el efecto que el tipo de vehículo, la rugosidad del pavimento, la velocidad de circulación, el nivel de carga y las características de rigidez y amortiguamiento de la suspensión, tienen sobre la energía almacenada en el pavimento. Asimismo, considerando el carácter viscoelástico del pavimento, para un vehículo en particular se presenta la aplicación del modelo al análisis de la influencia que tiene el tipo de suspensión y de neumáticos, así como la temperatura del pavimento, sobre la magnitud de la energía almacenada. De los resultados de estos análisis, se observa la gran importancia que tiene el nivel de carga, la velocidad del vehículo y la temperatura del pavimento, sobre la cantidad de energía almacenada.

Atendiendo la necesidad de contar con evaluaciones de campo locales de la interacción vehículo pesado - pavimento, se presenta el análisis de los niveles de esfuerzo a los que un tipo particular de vehículo queda sometido como resultado de la respuesta dinámica del mismo al perfil del pavimento. Se evalúan asimismo los niveles de impacto que vehículos equipados con distintos tipos de suspensión ejercen sobre el pavimento. Los resultados sugieren que conducir vehículos sobrecargados a alta velocidad y en caminos de alta rugosidad reduce significativamente la vida útil del vehículo.

De las pruebas de impacto, existe evidencia que hace suponer que bajo ciertas condiciones la suspensión de aire es menos dañina que la de hojas.

Finalmente, se presenta un análisis del estado de la infraestructura de la red carretera nacional y del equipo de transporte, analizando detalles de operación de esta red, presentándose datos sobre la participación en el manejo de la carga, por tipo de vehículo, su grado de utilización, la edad de la flota y los resultados iniciales de un estudio sobre las velocidades de operación. Se presentan resultados sobre el efecto de la sobrecarga, la sobrevelocidad y el empleo de suspensiones denominadas amigables en el deterioro de las carreteras. Con base en los datos de la red y a resultados experimentales y numéricos, se establece un escenario conservador, del cual se deduce un potencial de ahorro de deterioro de la red carretera en México, a partir de sus condiciones actuales físicas y de operación, si se evita la sobrecarga, la sobrevelocidad y se fomenta el empleo de suspensiones amigables en los vehículos del servicio público federal. Del escenario presentado, se observa que el potencial de ahorro en la velocidad de deterioro de la red carretera, es de alrededor del 15%.

Abstract

There is a worldwide concern about the huge budgets allocated to road maintenance and rehabilitation. In this context, this work presents theoretical and experimental approaches to studying vehicle - road interaction. The studies presented, have the aim of identifying the most important factors (both, vehicle and road related) that affect this pavement-vehicle interaction, and to estimate possible friendly scenarios for using the infrastructure. A conceptual model is introduced in which the strain energy stored within the pavement is associated with the potential road damage. Models simulating vehicle dynamic response to road profile are presented. These models were developed using a Newtonian approach; being solved the resulting motion equations by applying the Transition Matrix Approach. Two applications of these models are presented, the first one evaluates the effect on pavement loads of type of vehicle, road roughness, transit velocity, pay load level and stiffness and damping constants of vehicle's suspension. The second one evaluates the effect on pavement of using air or leaf suspension, bias or radial tires, and vehicles travelling on cold or hot pavement. Overall results signal out the remarkable importance that, on the interaction vehicle-pavement, play vehicle payload level, transit velocity and pavement temperature.

Attending the need of having local field evaluations of vehicle - pavement interaction, an analysis of the stress level withstood by a certain vehicle as a result of pavement profile, is presented. Also, the dynamic load factor on the road is measured as a function of suspension type (air or leaf). Results suggest that the biggest stresses in the vehicle are related to using overloaded vehicles, travelling on high roughness pavement. From the impact tests, it was found certain evidence that air suspension is relatively more road friendly than leaf spring suspensions.

Considering the number of roads and vehicles as well as freight operating conditions at national level, some scenarios for reducing pavement damage are presented. From these analyses, a road damage percentage reduction potential of 15% is identified.



Resumen ejecutivo

La importancia del estudio de la interacción vehículo pesado - pavimento se deriva de los costos involucrados en la conservación de la red carretera y en aquellos asociados al mantenimiento de los vehículos, producto de su desgaste al circular por pavimentos en mal estado. De esta manera existe una preocupación mundial por conocer los aspectos más importantes que afectan esta interacción. Al respecto, este trabajo presenta los resultados de aproximaciones teóricas y experimentales asociadas a la interacción vehículo pesado - pavimento, que permiten identificar el efecto que tanto factores asociados a los vehículos como a los pavimentos, tienen sobre los niveles de deterioro de la red. Con base en estos estudios, se presentan esquemas amigables para el uso de la infraestructura, mismos que pudieran redituar en ahorros en el deterioro de los pavimentos. En los trabajos que se presentan, se introduce un modelo conceptual en el que la energía de deformación almacenada en el pavimento se considera asociada al deterioro del mismo, desarrollando los modelos matemáticos que permiten obtener la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento. Los modelos se dedujeron con base en la aplicación de un enfoque Newtoniano y los sistemas de ecuaciones lineales resultantes, se resuelven mediante la aplicación del Método de las Matrices de Transición. A partir de los modelos desarrollados, se analiza el efecto que el tipo de vehículo, la rugosidad del pavimento, la velocidad de circulación, el nivel de carga y las características de rigidez y amortiguamiento de la suspensión, tienen sobre la energía almacenada en el pavimento. Asimismo, considerando el carácter viscoelástico del pavimento, para un vehículo en particular se presenta la aplicación del modelo al análisis de la influencia que tiene el tipo de suspensión y de neumáticos, así como la temperatura del pavimento, sobre la magnitud de la energía almacenada. De los resultados de estos análisis, se observa la gran importancia que tiene el nivel de carga, la velocidad del vehículo y la temperatura del pavimento, sobre la cantidad de energía almacenada.

Atendiendo la necesidad de contar con evaluaciones de campo locales de la interacción vehículo pesado - pavimento, se presenta el análisis de los niveles de esfuerzo a los que un tipo particular de vehículo queda sometido como resultado de la respuesta dinámica del mismo al perfil del pavimento. Se evalúan asimismo los niveles de impacto que vehículos equipados con distintos tipos de suspensión ejercen sobre el pavimento. Los resultados sugieren que conducir vehículos sobrecargados a alta velocidad y en caminos de alta rugosidad reduce significativamente la vida útil del vehículo.

De las pruebas de impacto, existe evidencia que hace suponer que bajo ciertas condiciones la suspensión de aire es menos dañina que la de hojas.

Finalmente, se presenta un análisis del estado de la infraestructura de la red carretera nacional y del equipo de transporte, analizando detalles de operación de esta red, presentándose datos sobre la participación en el manejo de la carga, por tipo de vehículo, su grado de utilización, la edad de la flota y los resultados iniciales de un estudio sobre las velocidades de operación. Se presentan resultados sobre el efecto de la sobrecarga, la sobrevelocidad y el empleo de suspensiones denominadas amigables en el deterioro de las carreteras. Con base en los datos de la red y a resultados experimentales y numéricos, se establece un escenario conservador, del cual se deduce un potencial de ahorro de deterioro de la red carretera en México, a partir de sus condiciones actuales físicas y de operación, si se evita la sobrecarga, la sobrevelocidad y se fomenta el empleo de suspensiones amigables en los vehículos del servicio público federal. Del escenario presentado, se observa que el potencial de ahorro en la velocidad de deterioro de la red carretera, es de alrededor del 15%.

1. Introducción

El problema de la interacción de los vehículos pesados con el pavimento, tiene dos vertientes, por un lado, se requiere analizar el daño que sufre la carretera por el paso de los vehículos, y por el otro, el deterioro de los vehículos y la carga que transportan, en función del estado superficial de la carretera. En ambos casos, la importancia económica del problema es alta, tanto para el transportista como para las entidades encargadas del mantenimiento de las carreteras. En el Instituto del Transporte, se han llevado a cabo investigaciones que, de acuerdo a las condiciones locales, permiten estimar cualitativamente el efecto que tiene la sobrecarga, la sobrevelocidad y el tipo de suspensión de los vehículos pesados, sobre la velocidad de deterioro de las carreteras. También se ha evaluado, el efecto que tiene la rugosidad de la carretera en el nivel de esfuerzos que se presenta en la suspensión del vehículo.

En este trabajo se presentan una serie de artículos que describen en detalle las investigaciones realizadas sobre la interacción de los vehículos pesados con el pavimento. Como resultado de estos estudios, parece que podría reducirse la velocidad de deterioro de la red carretera en México si se toman acciones de política que fomenten el empleo de suspensiones y condiciones de operación amigables.

En el primer trabajo presentado, se evalúa la relación entre la energía almacenada en el pavimento y el daño a la carretera. Esta evaluación se hace empleando modelos matemáticos de diferentes vehículos pesados y configuraciones del pavimento. La interacción vehículo-carretera, se simula suponiendo que el pavimento se comporta como un material viscoelástico, considerando los vehículos como sistemas lineales masa-amortiguador-resorte. Para las diferentes configuraciones vehiculares presentadas, se analiza la influencia de la presión de inflado de las llantas, la rigidez de la suspensión, el nivel de carga y la rugosidad de la carretera, sobre el desempeño de los vehículos. Con base en los resultados de esta simulación, se presenta un "nivel de amigabilidad" del vehículo, como una función de la energía de deformación acumulada en el pavimento.

El segundo trabajo que se presenta, emplea el modelo masa-amortiguador-resorte de un conjunto vehicular T3S2 actuando sobre un modelo del pavimento de naturaleza viscoelástica. Esta conjunción de modelos, permite analizar la variación de la energía de deformación del pavimento y del factor de impacto dinámico, respecto a la velocidad de desplazamiento del vehículo, temperatura del pavimento, carga, tipo de llantas, de suspensión y

dimensiones del vehículo. Los resultados que se obtienen de estas simulaciones, muestran buena coincidencia con lo reportado en la práctica.

Tomando en cuenta que, a pesar de la gran cantidad de trabajos experimentales que abordan el problema de la interacción de los vehículos pesados con el pavimento, es necesario disponer de mediciones locales para evaluar el desempeño de casos específicos de vehículos y condiciones particulares del camino; en el tercer trabajo se presentan los resultados de una serie de mediciones experimentales que relacionan la interacción de un vehículo con el pavimento, considerando los dos aspectos fundamentales del problema: por un lado, el efecto de la condición del pavimento sobre el desempeño del vehículo y, por el otro, la influencia del comportamiento dinámico y las condiciones de operación del vehículo sobre el pavimento. En particular, se evalúa el nivel de esfuerzos al que se somete un autotank ante condiciones de rugosidad diferentes, la variación del nivel de esfuerzos en una plataforma como función de la velocidad, el comportamiento dinámico de vibración de un vehículo pesado por efecto del tipo de suspensión y de la velocidad, y el nivel de impacto producido por un vehículo pesado sobre el pavimento con distintos tipos de suspensión y a diferentes velocidades. Los resultados sugieren que conducir vehículos sobrecargados a alta velocidad y en caminos de alta rugosidad reduce significativamente la vida útil del vehículo. De las pruebas de impacto, se obtuvo evidencia que hace suponer que bajo ciertas condiciones la suspensión de aire es menos dañina que la de muelles.

En el cuarto trabajo que se presenta se incluye un panorama sobre el estado y utilización de la red carretera y su importancia económica en México, así como los resultados de investigaciones teóricas y experimentales llevadas a cabo en el Instituto Mexicano del Transporte, en relación a la evaluación del deterioro de la red por efecto del paso de vehículos pesados. Se analizan detalles de operación de la red carretera presentándose datos sobre la participación en el manejo de la carga, por tipo de vehículo, su grado de utilización, la edad de la flota y los resultados iniciales de un estudio sobre las velocidades de operación. Se presentan resultados sobre el efecto de la sobrecarga, la sobrevelocidad y el empleo de suspensiones denominadas amigables en el deterioro de las carreteras. Con base en los datos de la red, los resultados experimentales y de simulaciones numéricas, se establece un escenario conservador, para evaluar cualitativamente el potencial de ahorro de deterioro de la red carretera en México a partir de sus condiciones actuales físicas y de operación, si se evita la sobrecarga, la sobrevelocidad y se fomenta el empleo de suspensiones amigables en los vehículos del servicio público federal. Del escenario presentado, se identificó que el potencial de reducción de la velocidad de deterioro de la red carretera es de alrededor del 15%.

2. Respuesta dinámica de la suspensión de vehículos pesados y su relación con el daño potencial a carreteras

2.1 Introducción

La evaluación del daño causado a la carretera por las diferentes configuraciones de vehículos pesados (VP), es un problema de primordial importancia ya que conociendo las causas del daño, será posible fomentar el empleo tanto de las configuraciones vehiculares adecuadas como de suspensiones apropiadas a emplear en tales configuraciones. Todo esto encaminado a mantener a niveles manejables los enormes costos de mantenimiento de las carreteras.

Al respecto, se cuenta con evidencia experimental de que algunas de las configuraciones vehiculares de VP producen menos daño a la carretera. Esta característica, que en este trabajo se definirá como "*amigabilidad*" del vehículo, depende del tipo de suspensión a usar, de la presión de inflado de las llantas, de la carga por eje, del peso bruto vehicular, de la velocidad del viaje de los VP y de la rugosidad de la carretera. Se estima que los parámetros anteriores son los principales que afectan, tanto la respuesta del vehículo a las condiciones del pavimento, como el daño que le causan al pavimento los vehículos tanto en condiciones estáticas como dinámicas. En este trabajo se presenta la simulación de la interacción vehículo-pavimento, empleando modelos matemáticos lineales tanto del vehículo como del pavimento.

El trabajo desarrollado está orientado a identificar la relación de la deformación de la superficie de la carretera con respecto al daño de la misma [9]. Se supone que la deformación del pavimento y su variación en el tiempo están directamente relacionadas con la energía de deformación acumulada producto del paso del tráfico de vehículos pesados. Con objeto de mantener un enfoque simplificado del problema, la deformación y daño de las subcapas interiores del pavimento no se consideran, a pesar de que las cargas dinámicas sobre el pavimento también afectan estas subcapas.

El deterioro de las carreteras debido al paso de vehículos pesados ha sido ampliamente estudiado por diversos autores entre los que destacan Cole [2], y Karamihas y Gillespie [4]. Si bien el enfoque presentado en este trabajo es simplificado respecto del presentado por otros autores, se reportan resultados suficientemente aproximados a la evidencia experimental y de otros modelos más elaborados, lo que hace que la aplicación de esta

aproximación sea versátil y rápida. Esta última característica permite la simulación de un gran número de condiciones del pavimento, de variantes de los parámetros de los vehículos pesados así como de la interacción vehículo-pavimento, lo que a su vez permite simular condiciones de tráfico real.

2.2 Nomenclatura

Con objeto de interpretar adecuadamente los diagramas y fórmulas presentados en este trabajo, a continuación se presenta la nomenclatura empleada.

Dimensiones [m]:

- a : distancia del eje direccional, al centro de gravedad (cg) del tractor.
- b : distancia del cg del tractor a la "quinta rueda".
- c : distancia del cg del eje direccional del tractor al cg de la suspensión tipo balancín del tractor (T3S2/S3).
- d : distancia del frente del soporte de la suspensión a su cg.
- e : distancia del frente de la percha central al cg del vehículo C3; distancia del eje del semirremolque a su cg (T2S1).
- f : distancia de la parte trasera del soporte de la suspensión al cg del camión C3 o semirremolque (T3S2 y T3S3).
- g : distancia de la "quinta rueda" al cg del semirremolque.
- p : mitad de la longitud de la barra balancín.

Constantes de rigidez [N/m] y coeficiente de amortiguamiento [N s/m]:

k_{s0} : constante de rigidez de la suspensión del eje delantero.

c_{s0} : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión del eje delantero.

k_{L0} : constante de rigidez de las llantas del eje delantero.

c_{L0} : coeficiente de amortiguamiento de las llantas del eje delantero.

k_{s1} : constante de rigidez de la suspensión del eje trasero (C2); constante de rigidez de la suspensión tipo balancín (T3S2/S3).

c_{s1} : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión del eje trasero (C2, C3); coeficiente de amortiguamiento de la suspensión tipo balancín (T3S2/S3).

k_{s2} : constante de rigidez de la suspensión del semirremolque.

c_{s2} : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión del semirremolque.

k_{L1} , k_L : constante de rigidez de las llantas del eje dual.

c_{L1} , c_L : coeficiente de amortiguamiento de las llantas del eje dual.

k : constante de rigidez de la suspensión tipo cuatro resortes.

c_s : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión tipo cuatro resortes.

Desplazamientos [m] y [rad]:

z_T : posición del cg del tractor.

z_0 : posición del eje direccional.

z_1 : posición del eje trasero (C2, C3); posición del eje delantero de la suspensión tipo balancín (T3S2/S3).

z_2 : posición del eje del semirremolque (T2S1); posición del eje trasero de la suspensión tipo balancín (T3S2/S3).

z_3 : posición del eje delantero de la suspensión tipo cuatro resortes (C3); posición del eje delantero del semirremolque (T3S2/S3).

z_4 : posición del eje trasero de la suspensión tipo cuatro resortes (C3); posición del eje trasero del semirremolque (T3S2); posición del eje intermedio del eje tridem del semirremolque (T3S3).

z_5 : posición del eje trasero del tridem del semirremolque (T3S3).

θ : ángulo de cabeceo del semirremolque.

ϕ : ángulo de cabeceo del tractor.

α : ángulo de la barra balancín delantera.

β : ángulo de la barra balancín trasera.

Perfil del Pavimento:

$\dot{Y}(i+s), \dot{Y}(i+q), \dot{Y}(i+o), \dot{Y}(i+m), \dot{Y}(i+n), \dot{Y}(i)$: variación con el tiempo, del perfil discretizado de la carretera para diferentes posiciones de las llantas [m/s].

2.3 Descripción de los modelos matemáticos

En este trabajo la respuesta dinámica de los vehículos pesados se obtiene empleando modelos lineales, siendo los vehículos simulados los que se encuentran más comúnmente en las carreteras de norteamérica. De acuerdo con la nomenclatura empleada en México, los vehículos pesados se designan con una C para los camiones (vehículos unitarios) y TS para las combinaciones vehiculares de tractor semirremolque. En esta nomenclatura, cada letra va seguida por un dígito que representa el número de ejes del cuerpo vehicular.

El pavimento se modeló como una serie de elementos resorte-amortiguador, lo que permite aproximar el comportamiento viscoelástico del pavimento. El modelo del pavimento permite simular la deformación y la energía acumulada, la cual se estima está relacionada con el daño al pavimento. Este grupo de modelos permite establecer la cantidad de energía que los diferentes tipos de vehículos pesados transfieren al pavimento. No obstante, no es posible, hasta este momento de la investigación, analizar los diferentes mecanismos mediante los que se daña el pavimento.

Las siguientes figuras (2.1 a 2.5) muestran los diagramas esquemáticos y el modelo de multicuerpos de los diferentes tipos de vehículos pesados simulados, considerando solamente los movimientos vertical y de cabeceo del vehículo en un mismo plano.

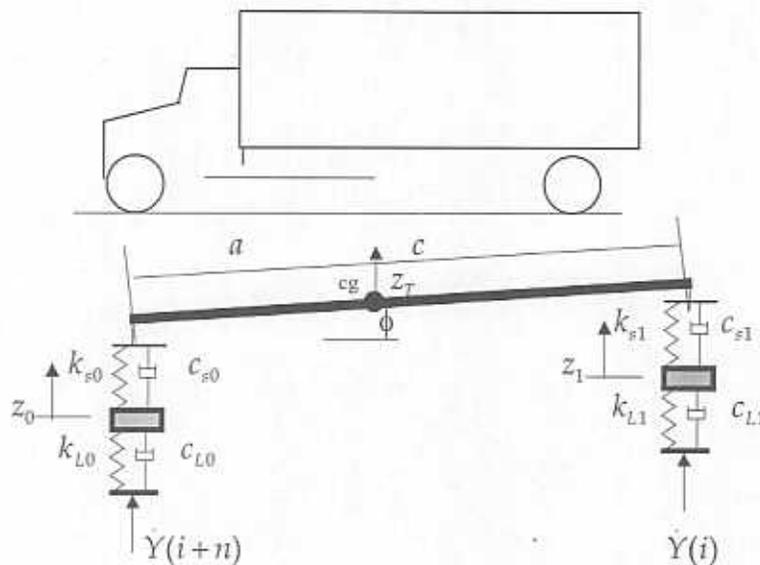


Figura 2.1. Modelo de un camión C2.

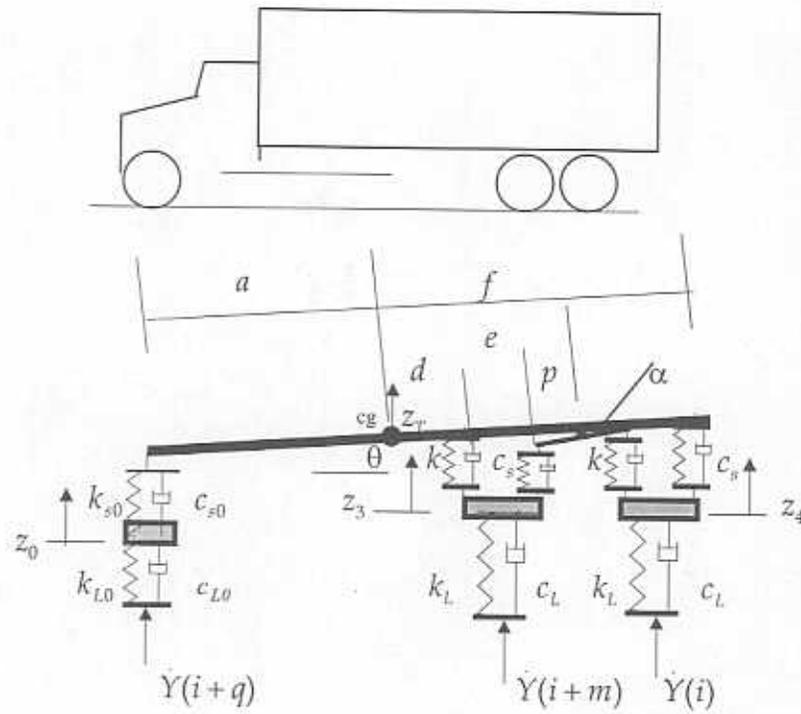


Figura 2.2. Modelo de un camión C3.

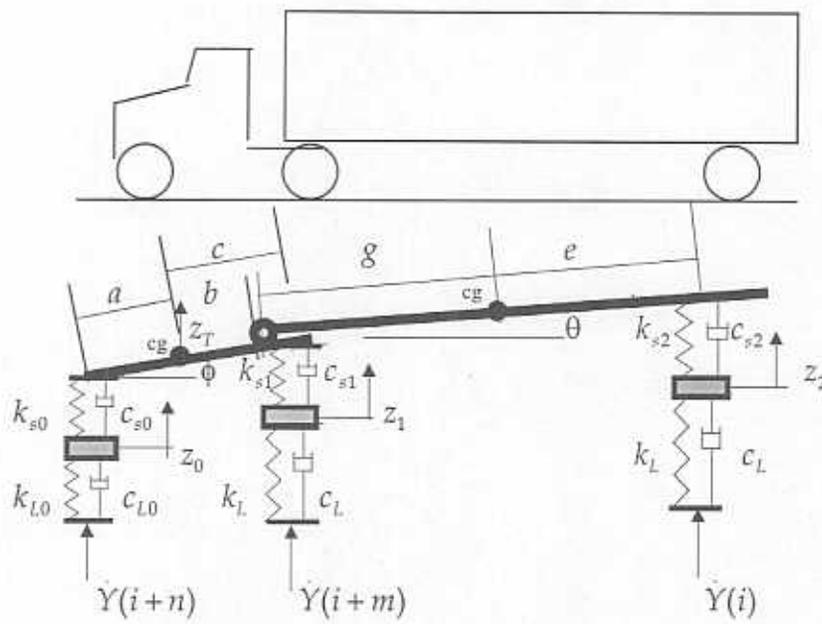


Figura 2.3. Modelo de un vehículo T2S1.

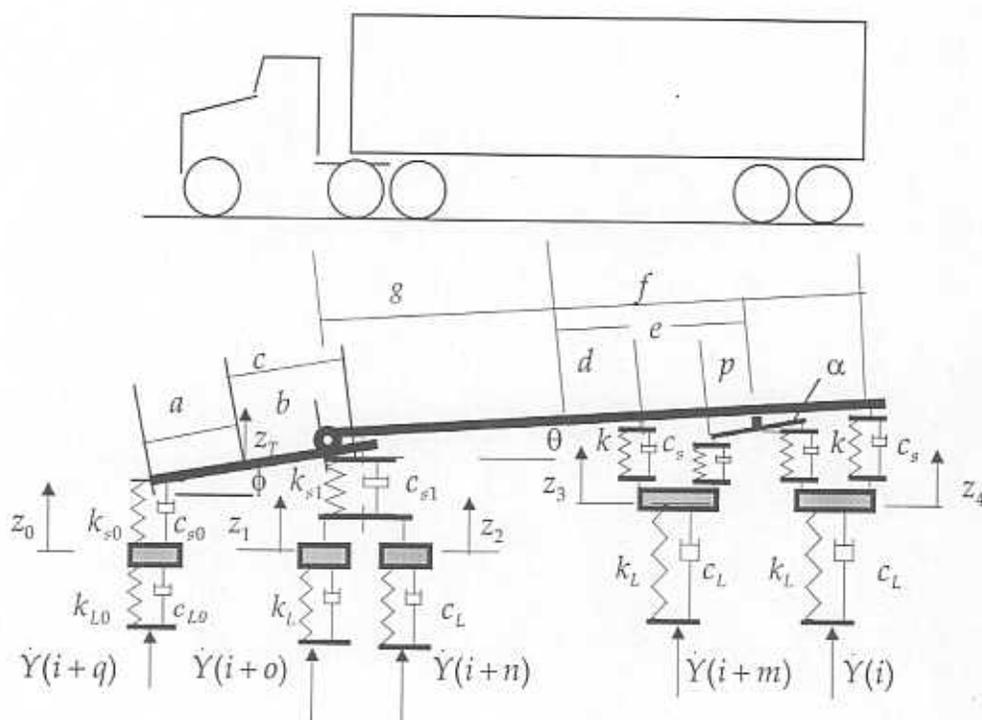


Figura 2.4. Modelo de un vehículo T3S2.

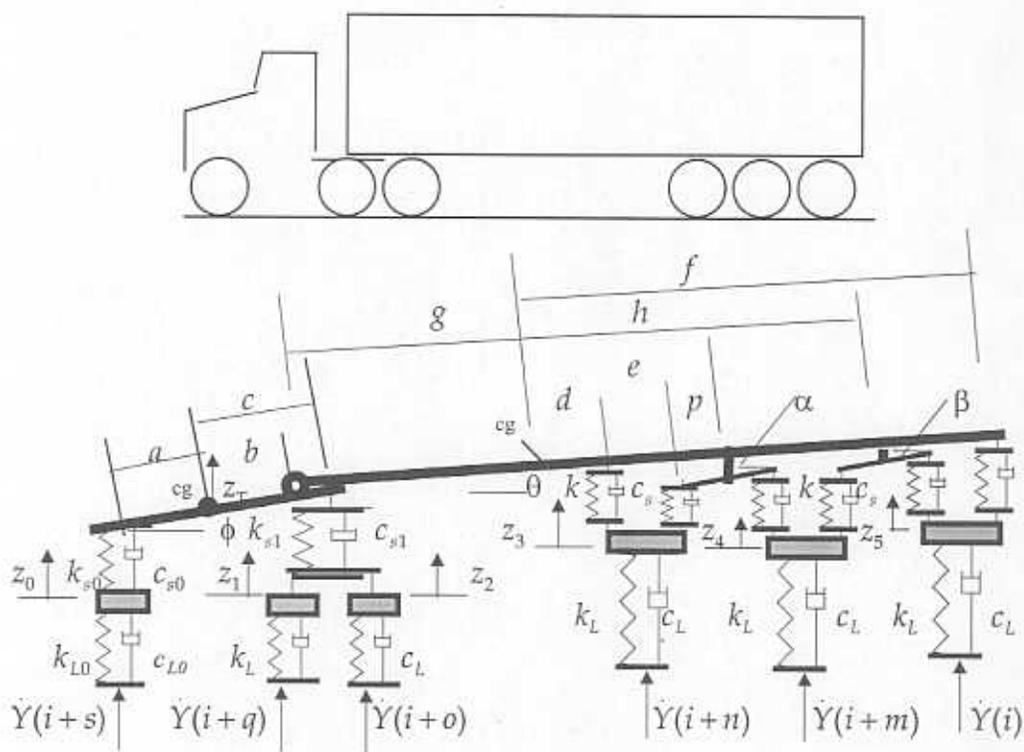


Figura 2.5. Modelo de un vehículo T3S3.

Las combinaciones vehiculares tractor semirremolque T3S2 y T3S3, se suponen equipados con suspensiones tipo "balancín" (*walking beam*) en el tándem trasero del tractor y para el tándem del semirremolque se simuló una suspensión tipo "cuatro resortes", como se muestra en las Figuras 2.4 y 2.5. El modelo del pavimento es una serie de elementos resorte amortiguador como se muestra en la Figura 2.6.

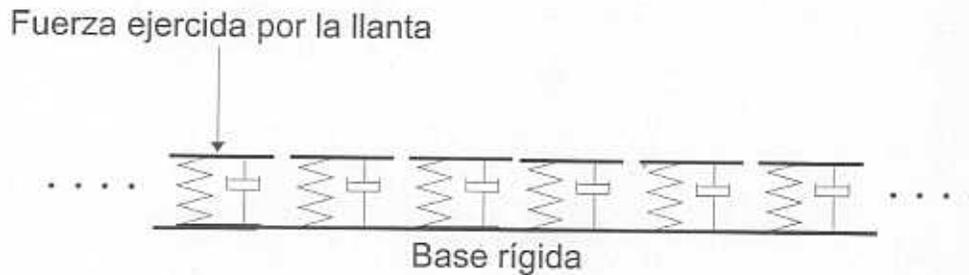


Figura 2.6. Modelo discretizado de pavimento, considerando sus características viscoelásticas.

2.4 Método de solución

Las ecuaciones que representan la dinámica de los vehículos pesados y del pavimento se resuelven empleando el método de la Matriz de Transición, de acuerdo a que este método es muy eficiente para resolver sistemas de primer orden [5]. Como en este trabajo todos los modelos son lineales, se procedió a aplicar este método, de tal manera que el vector de estado de un sistema con n grados de libertad está dado por:

$$z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}$$

y el estado relacionado con las fuerzas externas, sería el siguiente:

$$Z(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{F}(t) \end{Bmatrix}$$

Los vectores anteriores son de dimensión $2n$, de tal manera que la ecuación de movimiento para cada uno de los vehículos pesados simulados será:

$$\dot{z}(t) = [A]\{z(t)\} + [B]\{Z(t)\}$$

donde,

- $\{z(t)\}$ es el vector de estado,
 $\{Z(t)\}$ es el vector de fuerzas generalizadas asociado a $\{z(t)\}$,
 $[A]$ es la matriz de coeficientes de la respuesta libre y
 $[B]$ es la matriz de coeficientes de la respuesta particular.

Para sistemas discretos la solución general de la ecuación anterior es [6]:

$$\{z(k+1)\} = [\Phi]\{z(k)\} + [\Gamma]\{Z(k)\}$$

donde,

$$[\Phi] = e^{[A]T} \quad \text{y} \quad [\Gamma] = \int_0^T e^{[A](T-t)} dt [B]$$

Siendo $[\Phi]$ evaluada como una serie de Taylor.

Suponiendo que la rigidez y el amortiguamiento del pavimento se obtienen del modelo mostrado en la Figura 2.6, la deformación del pavimento estaría dada por:

$$c_p \dot{y}_p(t) + k_p y_p(t) = 0$$

la que tiene una solución de la forma:

$$y_p(t) = y_p(0) e^{-(k_p/c_p)t}$$

Considerando las condiciones iniciales del pavimento como $(y_p(0), \dot{y}_p(0))$, y tomando la constante de tiempo $-(k_p/c_p) = A_p$, la deformación del pavimento $(y_p(t) = y_p(0)e^{A_p t})$ se asocia a la energía de deformación, una vez que se obtiene la respuesta particular de la ecuación de movimiento.

Algoritmo de solución

El método de la matriz de transición ha sido empleado por Sayers [7], para resolver ecuaciones relacionadas con el movimiento de vehículos ligeros. Suponiendo que las fuerzas externas del sistema son producidas por la rugosidad del pavimento, y que para pequeños segmentos de carretera la pendiente de su perfil es constante, el vector de estado se puede expresar como:

$$y(t) = \left\{ \begin{array}{l} \dot{z}(t) \\ z(t) \end{array} \right\}$$

mientras que la matriz de la respuesta particular estaría dada por:

$$[\Gamma] = \int_0^T e^{[A]t} dt [B] = [A]^{-1} ([\Phi] - [I])[B] = [PR]$$

Con objeto de obtener la solución numérica de esta respuesta, $[\Phi]$ se calcula como:

$$[\Phi] = e^{[A]t} = [I] + [A]dt + [A][A]dt^2 / 2! + [A][A][A]dt^3 / 3! + \dots$$

de tal manera que la respuesta del sistema estaría dada por:

$$\{y(t + \Delta t)\} = \left\{ \frac{\dot{z}(t)}{\ddot{z}(t)} \right\} = [\Phi]\{y(t)\} + [PR]\{YP\}$$

donde $\{YP\}$ es el vector de excitación, considerando la pendiente entre dos puntos consecutivos del pavimento.

La energía almacenada en un volumen dado V del pavimento, ésta dada por [1]:

$$V = (1/2)E\varepsilon^2$$

donde ε es la deformación unitaria del pavimento, E es el módulo elástico de la mezcla asfáltica. Este módulo se obtiene considerando valores promedio para los parámetros que afectan el módulo elástico de la mezcla bituminosa E_b , y el módulo elástico de la mezcla de asfalto E_m , de acuerdo a las ecuaciones siguientes [3]:

$$E_b = 1.157 \times 10^{-7} t_i^{-0.368} 2.718^{-PI^{(R)}} (T_{RB}^{(R)} - T_{asp})^5$$

$$E_m = E_b [1 + (257.5 - 2.5VMA) / n(VMA - 3)]^n$$

donde,

$T_{RB}^{(R)}$ = temperatura de reblandecimiento de la mezcla bituminosa recuperada ($^{\circ}\text{C}$);

T_{asp} = temperatura de la capa de asfalto ($^{\circ}\text{C}$);

$PI^{(R)}$ = índice de penetración de la mezcla bituminosa;

t_i = tiempo de carga (s);

$n = 0.83 \log[(4 \times 10^4) / E_b]$;

VMA = porcentaje de huecos en el agregado mineral = porcentaje de huecos en la mezcla asfáltica + porcentaje de aglutinante bituminoso.

Sustituyendo los valores promedio para $PI^{(R)}$, $(T_{RB}^{(R)} - T_{asp})$ y VMA , en las expresiones para E_m y E_b , se obtiene el valor de E dado por $E = E_m$. De esta manera, E sólo es una función del tiempo de carga t_i .

Tomando en cuenta las expresiones anteriores para el modelo discreto de pavimento, tanto la deformación unitaria ε del pavimento, como la energía de deformación V , son función de elementos del pavimento que tienen volumen y longitud unitarios, de tal manera que $\varepsilon = y_p$, donde y_p es la deformación del pavimento. V está dada entonces por: $V = (1/2)E(t_i)y_p^2$.

La energía total almacenada E_T en los n elementos del modelo discreto del pavimento, producida por el paso de un vehículo pesado se obtiene como:

$$E_T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E(t_i) y_p^2(t)$$

2.5 Programa de computadora

Con base en la formulación presentada, es posible analizar la variación de la energía de deformación acumulada en el pavimento como una función de los parámetros del propio pavimento y del tipo de vehículo pesado que se considere. Los parámetros que intervienen en este análisis son: la rugosidad del camino medido como Índice Internacional de Rugosidad (IIR), la velocidad de los vehículos pesados, el nivel de carga y la rigidez de la suspensión y de las llantas. Para las simulaciones que se presentan en este trabajo, el perfil del pavimento empleado (Figura 2.7) se discretizó en segmentos de 0.5 m de longitud. En todos los resultados presentados sobre el desempeño de los vehículos se consideraron los pesos y dimensiones especificados en la Norma Oficial Mexicana correspondiente [8]. Asimismo, las características de rigidez y amortiguamiento del modelo de pavimento se consideraron constantes. El coeficiente de amortiguamiento se determinó a partir del componente viscoso del modelo viscoelástico resorte-amortiguador supuesto para el pavimento.

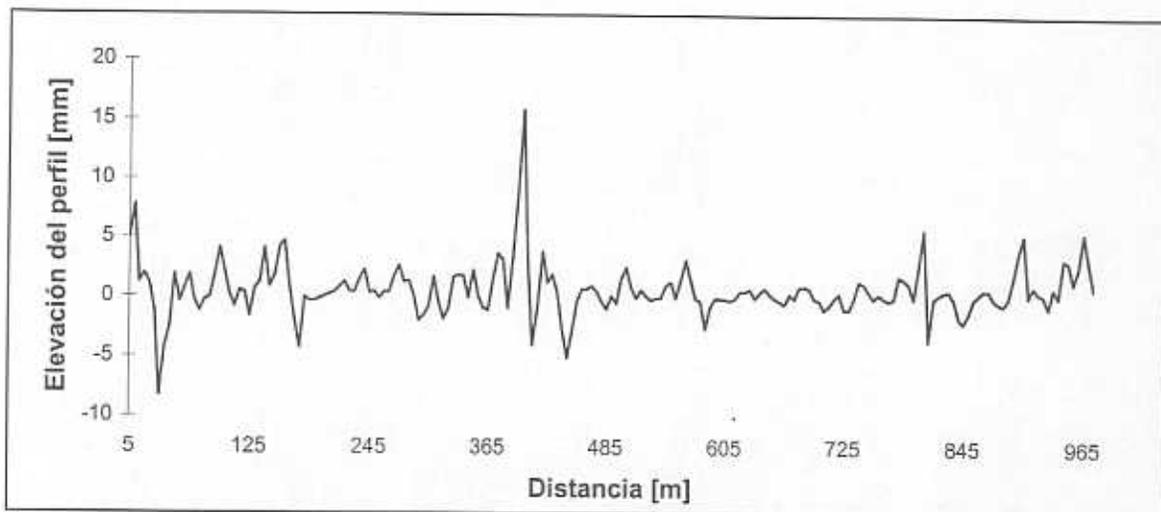


Figura 2.7. Perfil de la carretera empleado para las pruebas que se reportan.

En la Figura 2.8 se muestra la variación de la energía de deformación como una función del IIR para las diferentes configuraciones vehiculares. Las curvas mostradas se calcularon con los vehículos al 100 % de carga, viajando a 80 km/h. De esta figura, se puede observar que entre más grados de libertad tenga el vehículo mayor será su respuesta a la rugosidad del pavimento, causando por lo tanto, mayor daño al mismo. De esta figura también se puede observar que entre más pesado es el vehículo, mayor influencia tiene el IIR en su respuesta. Esto último implica que un camino dañado almacenaría mayor energía de deformación, que uno en buenas condiciones. Esto es, una carretera dañada se deteriorará más rápido que una en buenas condiciones.

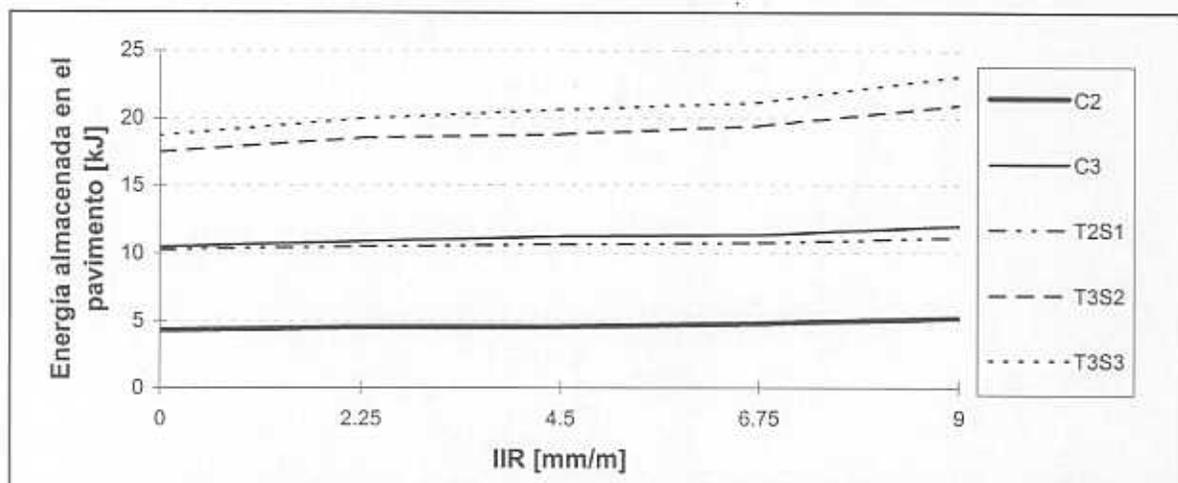


Figura 2.8. Energía de deformación del pavimento para varios valores del IIR.

En la Figura 2.9 se muestra la variación de la energía de deformación a lo largo de la longitud del camino. Las condiciones de operación de los vehículos, para la obtención de esta figura, son las mismas utilizadas para obtener los resultados de la Figura 2.8. En la Figura 2.9 se puede identificar que los niveles de la energía de deformación transmitidos al pavimento, siguen un comportamiento cíclico característico de cada vehículo. Este comportamiento está influido por las masas suspendidas del vehículo y tiene una frecuencia similar al modo de vibración de las masas suspendidas.

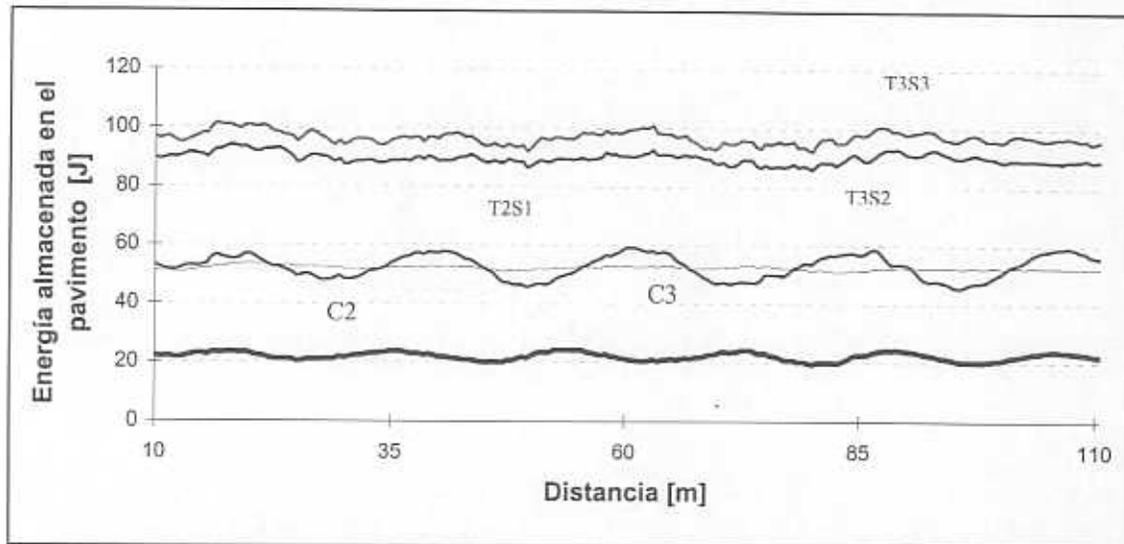


Figura 2.9. Distribución de la energía de deformación a lo largo del tramo de prueba.

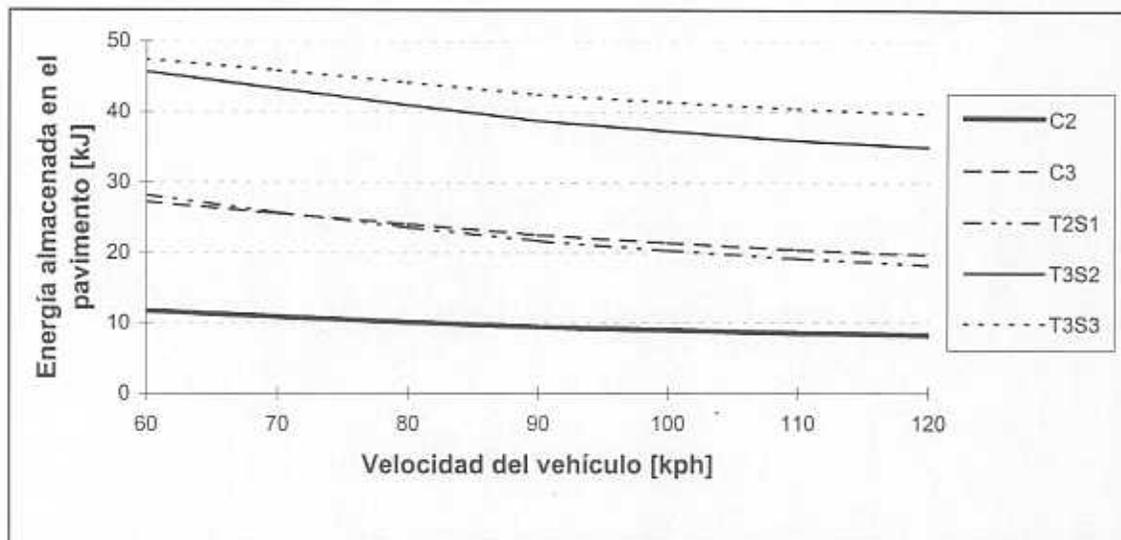


Figura 2.10 Variación de la energía de deformación en el tramo de prueba, con respecto a la velocidad, por tipo de vehículo

De los resultados mostrados en la Figura 2.10, es posible observar que la energía de deformación almacenada en el pavimento está relacionada con el tiempo que permanece el vehículo pesado sobre un segmento de carretera en particular, esto es, depende de la velocidad del paso del vehículo pesado. Los resultados también muestran, que entre mayor número de grados de libertad tenga el vehículo, menor influencia tiene la velocidad de paso del vehículo sobre la energía de deformación acumulada en el pavimento. Para los datos considerados en las simulaciones presentadas, incrementar la velocidad de paso del vehículo de 60 km/h a 120 km/h redujo el nivel de energía de deformación transmitida en alrededor del 30% para un vehículo tipo C2, mientras que para un T3S3, la reducción fue del 16%.

La influencia de la sobrecarga de los vehículos pesados sobre el daño al pavimento, por lo que respecta a la energía de deformación almacenada, es más pronunciada entre más grados de libertad tenga el vehículo, como se muestra en la Figura 2.11. Si se toma como referencia la condición del 100% de carga para cada vehículo, una sobrecarga del 50% produciría un aumento en la energía de deformación almacenada de 75% para un vehículo C2, de 82% para un C3, de 76% para un T2S1 y de 80% para un T3S2 y un T3S3.

La influencia de la rigidez de la suspensión y las llantas, sobre el nivel de energía de deformación almacenada, se muestra en las Figuras 2.12 y 2.13. En estas figuras se utilizó como referencia un valor nominal de rigidez de llanta y suspensión, para cada tipo de vehículo. A partir de esta referencia se simuló variaciones de +/- 30% de la rigidez, obteniéndose las variaciones correspondientes para la energía de deformación. Como puede observarse en estas figuras, la variación es pequeña. Sin embargo, si se toman en cuenta los volúmenes de tráfico que en algunas carreteras alcanza el paso de miles de vehículos por día por el mismo punto, la acumulación de la deformación tiene una influencia determinante en el deterioro del pavimento.

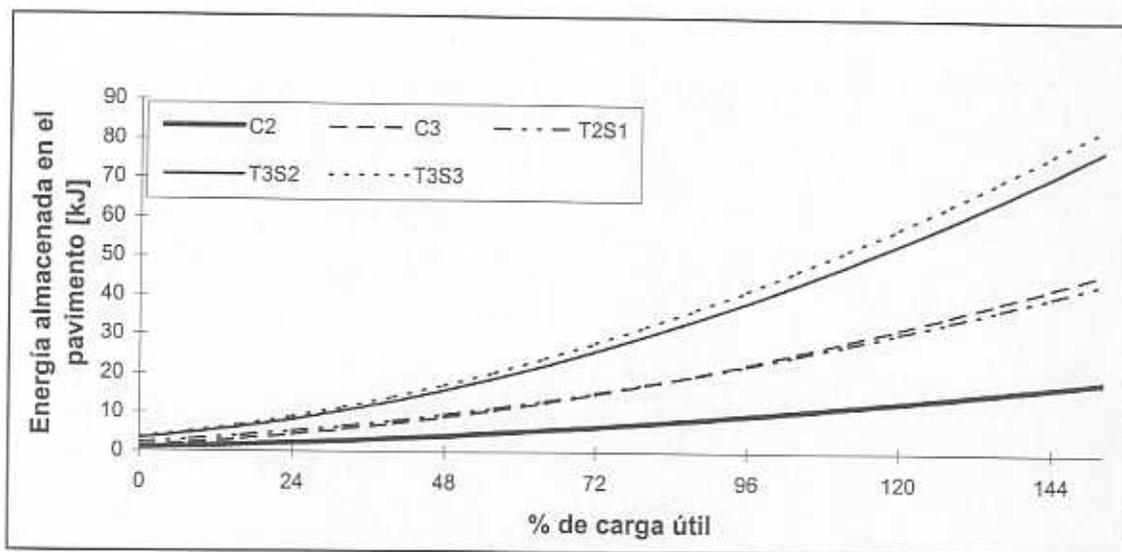


Figura 2.11. Energía de deformación del tramo de prueba, en función de la carga transportada por los diferentes vehículos.

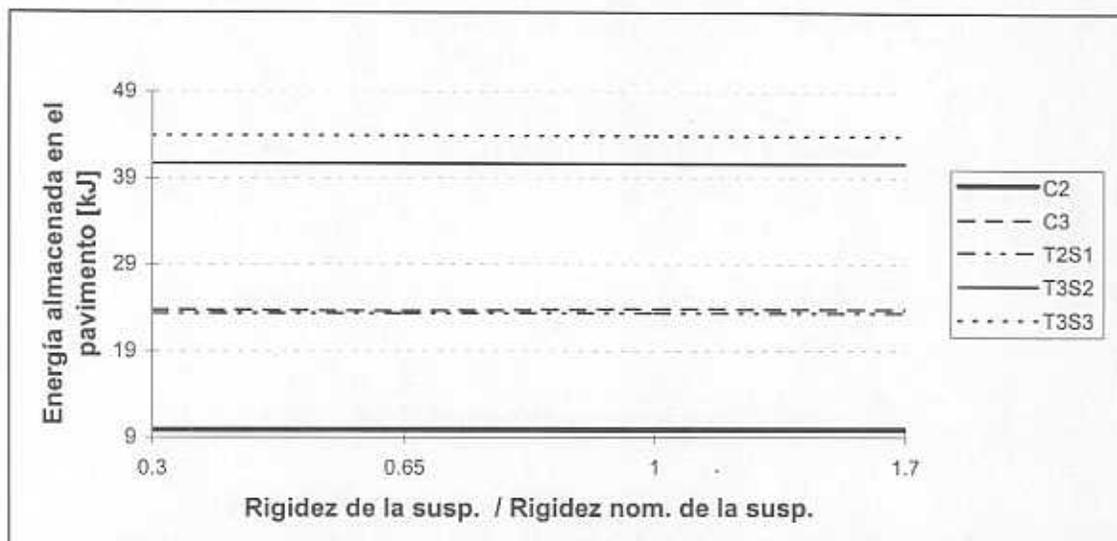


Figura 2.12. Energía de deformación del tramo de prueba, en función de la rigidez de la suspensión de los vehículos.

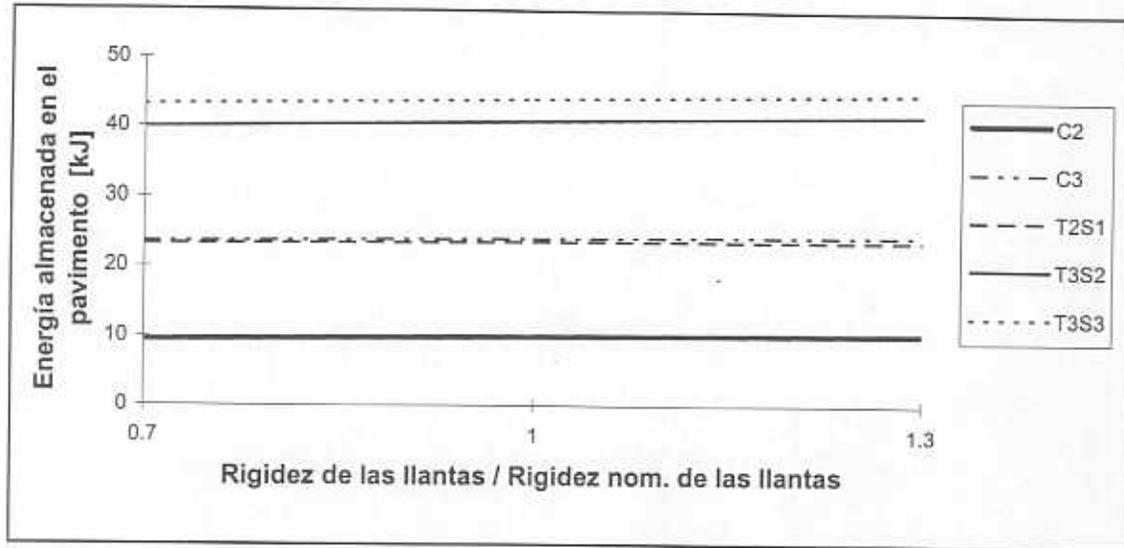


Figura 2.13. Energía de deformación del tramo de prueba, en función de la rigidez de las llantas de los vehículos.

2.6 Conclusiones

De los resultados de las simulaciones mostradas en este trabajo, se tiene que los factores que mayormente afectan el deterioro del pavimento son el nivel de carga transportada, la velocidad de tránsito del vehículo y la rugosidad del pavimento. De acuerdo con estos resultados, se encuentra que la relación entre el nivel de carga del vehículo y el deterioro del pavimento es aproximadamente cuadrática, lo que implica que al aumentar el nivel de carga transportada por el vehículo, se provocará que el daño ocasionado al pavimento aumente con el cuadrado del valor de la fuerza estática.

Por cuanto a la velocidad y para el nivel de rugosidad del pavimento considerado en este trabajo (en general, bajo), de los resultados obtenidos se muestra que el efecto sobre el deterioro del pavimento disminuirá en la medida en que los vehículos circulen a mayor velocidad en un camino en buenas condiciones. Esto es, el efecto de la velocidad está asociado a la respuesta viscoelástica del material asfáltico del pavimento. Aunque esta variación es pequeña, el paso de un gran número de vehículos (miles de unidades de carga por día) hará que el deterioro acumulado del camino, se manifieste en pocos meses de uso.

De los resultados obtenidos de los modelos, también se identifica que existe una distribución de energía a lo largo del camino, por lo que podrían identificarse puntos en los que el daño a la carretera sea mayor.

Respecto al efecto de cambiar el tipo de suspensión del vehículo, el modelo presentado en este trabajo muestra poca sensibilidad. Por lo tanto, se hace necesaria la inclusión en el modelo de los efectos no lineales, los cuales se presentan en los distintos tipos de suspensiones.

Una aplicación directa del modelo desarrollado, consiste en la evaluación comparativa del efecto que algunos factores - tanto relacionados con el pavimento como con el vehículo - tienen sobre la magnitud de la energía almacenada en el pavimento. Estas aplicaciones potenciales de los modelos desarrollados tienen gran diversidad e importancia, al permitir incluir elementos adicionales, tales como la temperatura del pavimento, volumen de huecos en la mezcla asfáltica, viscosidad del aglutinante asfáltico y la posición del centro de masa del vehículo, en el análisis de la interacción vehículo pesado - pavimento.

2.7 Referencias

1. Bland D.R., 1960. "The Theory Of Linear Viscoelasticity". Pergamon Press.
2. Cole D.J. y Cebon D., 1994. "Truck Suspension Design To Minimize Road Damage". Technical Report. University of Cambridge, Department of Engineering.
3. Collop A.C. y Cebon D., 1995. "Parametric Study Of Factors Affecting Flexible-Pavement Performance". Journal of Transportation Engineering. Vol 121. No.6. Pp 485-494.
4. Karamihas S.M. y Gillespie T.D., 1994. "Trucks And Pavement Wear: Findings From New Research", UMTRI Research Review. No. 6. Vol. 24. University of Michigan, Transportation Research Institute.
5. Meirovitch L., 1970. "Methods Of Analytical Dynamics". McGraw-Hill.
6. Meirovitch L., 1986. "Elements Of Vibration Analysis". McGraw-Hill.

7. Sayers, M, Gillespie T.D. y Queiroz, C.A, 1986. "The International Road Roughness Experiment". World Bank, Technical Paper No. 45.
8. SCT, 1995. *Norma Oficial Mexicana sobre los Pesos y Dimensiones de los vehículos que circulan por la red federal de carreteras*. NOM-12-SCT-2-1995.
9. Southgate H.F., 1991. "Distributions of strain components and work within flexible pavement structures". Transportation Research Record. No. 1307. Pp 39-50.

3. Vehículos pesados, modelado de la interacción viscoelástica llanta - suspensión - pavimento

3.1 Introducción

No obstante que en la literatura se ha reportado una gran cantidad de información relacionada con el deterioro de los pavimentos causado por el paso de los vehículos pesados, existe todavía un gran número de preguntas sin contestar acerca del papel que juegan en esta interacción las características de las llantas, suspensiones y tipo de pavimentos. Por ejemplo, no está clara la influencia que la carga del vehículo tiene sobre el pavimento, si se toman en cuenta el tipo de suspensión, llantas y la velocidad del vehículo. El modelado matemático de estas interacciones permitiría analizar la importancia que tiene la rugosidad del pavimento sobre la vibración de la carga y la suspensión, tomando en cuenta la rigidez y amortiguamiento de ésta. Así, sería posible evaluar el efecto que sobre el deterioro del pavimento tienen el nivel de carga y los diferentes tipos de suspensión y llantas.

En este contexto, esta sección presenta un modelo discreto que incluye al pavimento y a las características de rigidez y amortiguamiento de la suspensión y llantas. Tal modelo considera las masas del vehículo, suspensión y llantas, así como un esquema viscoelástico discreto para el pavimento. Son consideradas las características de rigidez y amortiguamiento tanto de la suspensión como de las llantas. Los valores de amortiguamiento y rigidez del pavimento son tomados de mediciones experimentales [1,2] y se asume que estas propiedades presentan una variación viscoelástica con la carga y la temperatura. En los puntos de contacto llanta - pavimento se introduce una fuerza de perturbación asociada a la respuesta dinámica del vehículo y a la rugosidad del pavimento.

Es importante hacer notar que en este trabajo no se busca presentar una simulación cuyos resultados sean absolutos, sino una que muestre las tendencias generales de la interacción, considerando en ello las principales variables involucradas en la misma.

Los valores para los distintos coeficientes de amortiguamiento y de rigidez corresponden a aquellos empleados para modelar vehículos pesados. Al respecto, se simulan suspensiones de aire y de hojas, así como llantas radiales y convencionales. Para esto se consideran valores experimentales

para las constantes de amortiguamiento y rigidez [3]. La velocidad del vehículo también es tomada en cuenta y en función de ella se establecen las fuerzas de perturbación. La respuesta del modelo de camiones es usada para evaluar un factor de carga dinámica. Una variación paramétrica es llevada a cabo y se presentan resultados numéricos del desempeño de los vehículos. En relación a los modelos de interacción camión - pavimento, Kenis et al [4], Monismith [5], Ullidtz y Larsen [6] han desarrollado modelos que relacionan la rigidez del pavimento con la velocidad de circulación de los camiones. De esta manera ha sido posible, en base a esa investigación, establecer que entre mayor es la velocidad del vehículo, menor es la deflexión del pavimento. No obstante, Alpan y Baker [7], Harr [8] y Kerr [9] han reportado que la deformación del pavimento no es una función de la velocidad del vehículo. Al respecto existen diversos modelos de pavimento, basados en vigas, resortes y amortiguadores, tales como los reportados por Fryba [10] y Nogemi y Lam [11]. Asimismo, modelos basados en placas y capas viscoelásticas a las que son aplicadas cargas superficiales armónicas [12], así como modelos de capas soportadas sobre bases rígidas [13,14]. Acerca de estas investigaciones, se destaca aquí que ninguna de ellas ha atendido el problema de la interacción camión - pavimento como un modelo integrado, a diferencia de lo que se introduce en este trabajo.

3.2 Modelo matemático

El enfoque del modelo matemático se basa en una perspectiva Newtoniana. El tipo de camión empleado en este modelo es el denominado combinación vehicular tractor-semirremolque. El pavimento ha sido considerado como un conjunto discreto de resortes (k_p) y amortiguadores (c_p), los cuales constituyen, a través de cada uno de los cinco ejes, la entrada o perturbación ($Y(t)$) al camión. Los arreglos vehicular y del pavimento se muestran en la Figura 3.1. Respecto al modelo de pavimento, éste toma en cuenta las variaciones de rigidez y de amortiguamiento, lo cual permite simular la dependencia de la temperatura de su comportamiento viscoelástico. Estas combinaciones discretas de resorte y amortiguador están separadas 10 cm, de tal manera que la huella de la llanta actúa sólo sobre una de estas combinaciones, al suponer que la carga en cada uno de los ejes no afecta más allá de una pequeña área alrededor de la huella de la llanta. Dependiendo de la velocidad de circulación del camión, la evolución de la deflexión producida por uno de los ejes del tractor, fue tomada como estado inicial para la aplicación de la carga del siguiente eje.

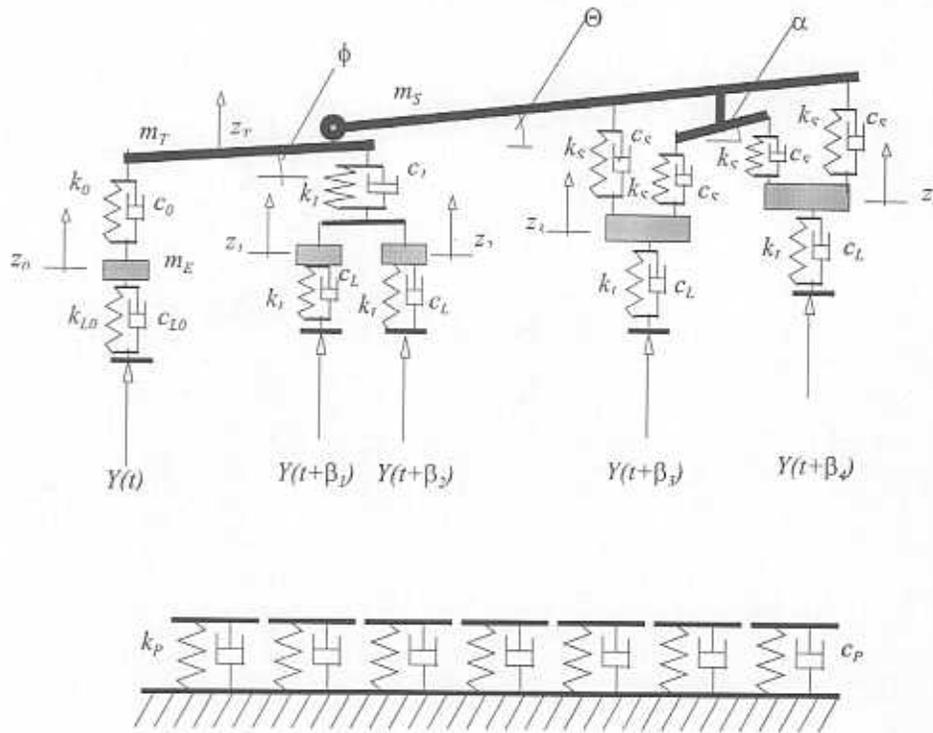


Figura 3.1. Arreglo de los modelos de vehículo y pavimento.

Sin considerar las deflexiones locales, el perfil del pavimento constituye la entrada de excitación al modelo del camión. Este modelo considera los factores de rigidez (k_L, k_{L0}) y de amortiguamiento (c_L, c_{L0}) de cada una de las llantas de los ejes. Considera asimismo a las masas de los ejes, llantas y del camión como masas discretas (m_T, m_S, m_E), unidas por elementos de rigidez y amortiguamiento que simulan la suspensión de cada eje ($k_0, k_1, k_s, c_0, c_1, c_s$). Este arreglo permite considerar diferentes tipos de suspensión y de llantas en cada uno de los ejes. El modelo aquí presentado considera, para la suspensión del tándem del tractor, una suspensión del tipo balancín, y para el tándem del semirremolque una suspensión de cuatro resortes. El momento de inercia del semirremolque se considera una función de la masa transportada.

Las ecuaciones de movimiento resultante para este modelo de nueve grados de libertad toman la siguiente forma general:

$$\begin{aligned}
 \ddot{z}_1 &= f(z_T, \phi, z_1, z_2, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{z}_1, \dot{z}_2) \\
 \ddot{z}_2 &= f(z_T, \phi, z_1, z_2, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{z}_1, \dot{z}_2) \\
 \ddot{\phi} &= f(z_T, \phi, \theta, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \\
 &\quad \dot{z}_0, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_4) \\
 \ddot{z}_0 &= f(z_T, \phi, z_0, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{z}_0) \\
 \ddot{z}_T &= f(z_T, \phi, \theta, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \\
 &\quad \dot{z}_0, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_4) \\
 \ddot{z}_3 &= f(z_T, \phi, \theta, z_3, \alpha, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{z}_3, \dot{\alpha}) \\
 \ddot{z}_4 &= f(z_T, \phi, \theta, z_4, \alpha, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{z}_4, \dot{\alpha}) \\
 \ddot{\alpha} &= f(z_3, z_4, \alpha, \dot{z}_3, \dot{z}_4, \dot{\alpha}) \\
 \ddot{\theta} &= f(z_T, \phi, \theta, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, \dot{z}_T, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \\
 &\quad \dot{z}_0, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_4)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

en donde cada una de las variables está definida en la Figura 3.1.

3.3 Procedimiento de solución

El grupo de ecuaciones diferenciales obtenido (3.1) es resuelto aplicando el Método de las Matrices de Transición [16]. Una vez obtenidas las nueve ecuaciones diferenciales lineales y realizando una derivación adicional [17], es posible establecer un grupo de ecuaciones de estado para $\ddot{z}, \ddot{\phi}, \ddot{\theta}$ y $\ddot{\alpha}$; pudiéndose expresar éstas en función de las matrices de coeficientes ($[A]$ para las variables y $[B]$ para la excitación). El conjunto de ecuaciones resultante tiene una solución de la forma [16]:

$$\{y(t)\} = e^{[A]t} \{y(0)\} + \int_0^t e^{[A](t-\tau)} [B] \{Y(\tau)\} d\tau \tag{3.2}$$

Esta expresión puede ser evaluada numéricamente, para obtener con ello las variables de movimiento del vehículo. Los detalles de los procedimientos algebraicos tanto para la solución como para la deducción de las ecuaciones van más allá del alcance de este documento, reportándose dichos detalles

en [15]. Una vez conocido el movimiento del camión, se calcula un factor de carga dinámica, el cual considera la diferencia de posiciones del eje y del perfil del pavimento, como una función de la respuesta dinámica del vehículo, la cual considera las características de rigidez y de amortiguamiento de las llantas. El valor resultante es referido a la carga estática sobre el pavimento. La fuerza calculada también es usada para evaluar la energía de deformación del pavimento, lo cual considera la rigidez y amortiguamiento del mismo. La deformación del pavimento se asume como la adición de las deformaciones causadas por los cinco ejes del vehículo a lo largo de la longitud del pavimento considerada.

La rugosidad del pavimento se mide en base al Índice Internacional de Rugosidad (IIR). El perfil del pavimento para los distintos niveles de IIR se obtuvo a partir de perfiles de pavimento generados aleatoriamente. La simulación de las diferentes condiciones de carga transportada fue obtenida al variar la masa del semirremolque y, consecuentemente, su momento de inercia de masa.

3.4 Realización de las pruebas

Influencia del tipo de suspensión sobre el factor de carga dinámica.

Determinado como una función de la velocidad del vehículo, el factor de carga dinámica se obtuvo para diferentes valores de los coeficientes de amortiguamiento y rigidez de la suspensión, siendo simuladas las distintas características intrínsecas a las suspensiones de hojas y de aire. Esta comparación de las respuestas de la suspensión se presenta, para tres distintos niveles de IIR, en la Figura 3.2.

En Figura 3.2(a) es posible observar que circular por caminos con pavimentos en malas condiciones puede acelerar el deterioro de éstos. Esto es, que una vez que se ha iniciado el deterioro del pavimento, la velocidad con que se seguirá deteriorando éste se incrementará dramáticamente. Es importante señalar que los valores indicados en esta gráfica no son valores absolutos y que representan la tendencia general al comparar los factores de carga dinámica asociados a los dos distintos tipos de suspensión simuladas. Al reducir la carga transportada, la influencia de las condiciones del pavimento es mostrada claramente, no obstante que no se observa diferencia alguna entre el comportamiento de ambos tipos de suspensión (Figura 3.2(b)).

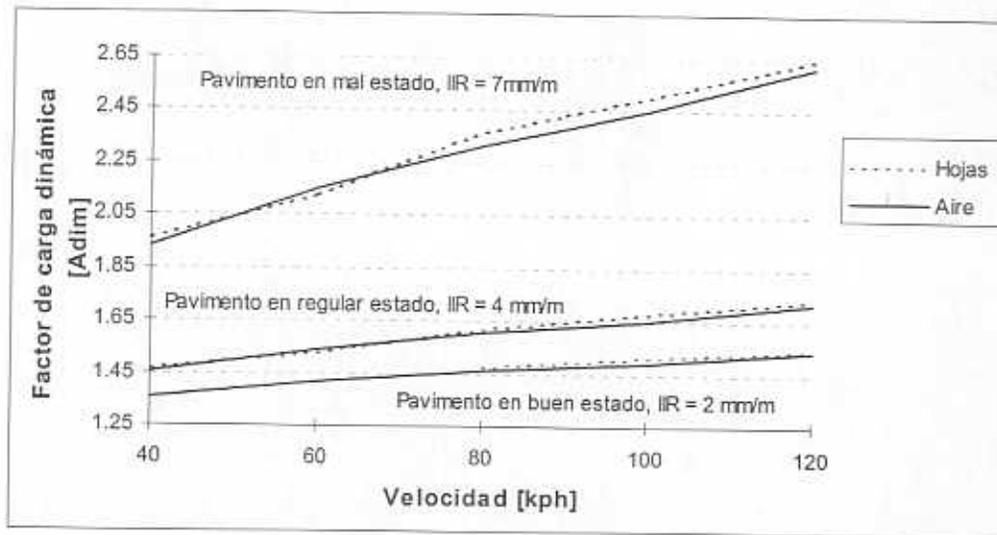


Figura 3.2 (a). Influencia de la rugosidad del camino sobre el Factor de Carga Dinámica (FCD).

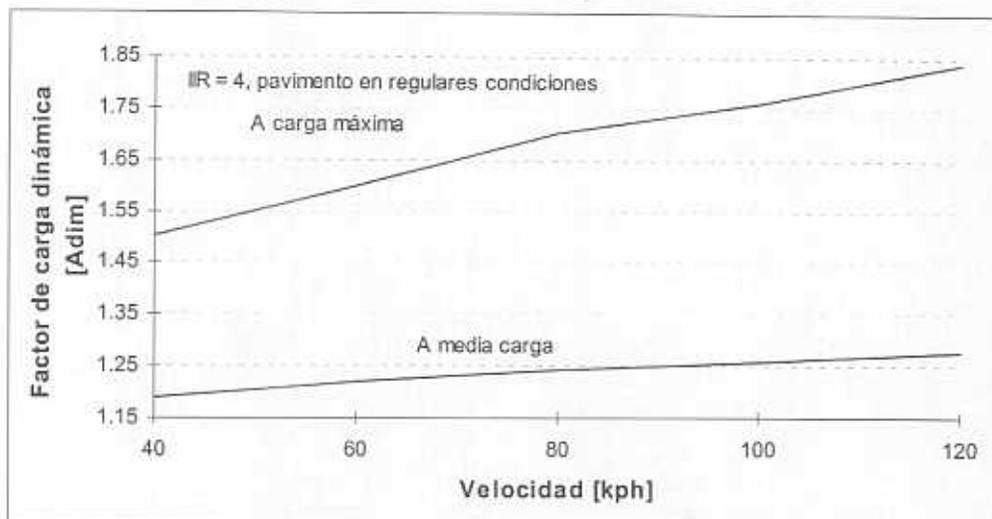


Figura 3.2 (b). Influencia de la carga útil sobre el FCD.

Influencia de las características de la llanta sobre el FCD.

La Figura 3.3 muestra las variaciones del factor de carga dinámica con la velocidad, para distintos camiones equipados con diferentes suspensiones (de aire y de hojas) y diferentes tipos de llantas (radiales y de costados rígidos). Los resultados son presentados para un pavimento con un IIR característico de un pavimento en buen estado.

Llantas sobreinfladas. Efecto sobre el factor de carga dinámica.

Una práctica común entre los conductores de camiones es el sobreinflar las llantas del vehículo, para obtener así un manejo más sencillo. Aunque esta práctica también produce condiciones más ásperas de vibración, se acostumbra debido a la facilidad de manejo y a los ahorros en el consumo de combustible.

La Figura 3.4 muestra dos casos extremos de sobreinflado de llantas. En la parte inferior se presentan los factores de carga dinámica producidos por un camión equipado con suspensión de aire y llantas radiales, bajo condiciones normales de inflado y de 20 por ciento de sobreinflado. En esta Figura, también se presenta el desempeño del vehículo al estar equipado con suspensión de hojas y llantas de costados rígidos, para condiciones normales de inflado y de 20 por ciento de sobreinflado. Atendiendo a estos resultados del modelo, usar suspensiones de aire con llantas radiales es la combinación más amigable para con el pavimento.

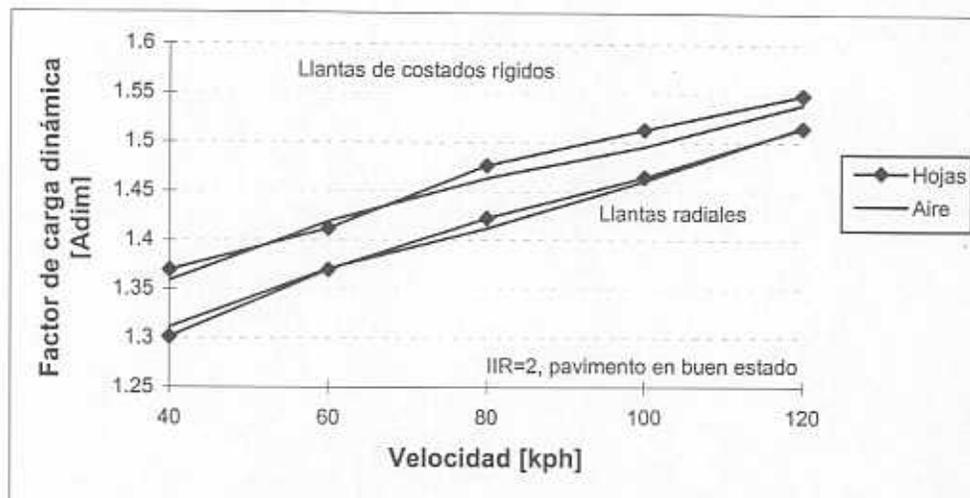


Figura 3.3. Influencia del tipo de llanta sobre el FCD.

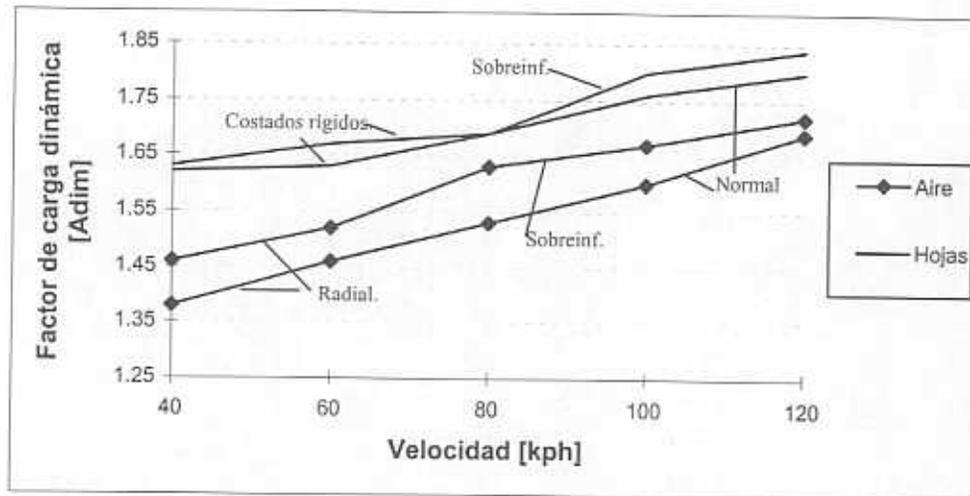


Figura 3.4. Influencia de la presión de inflado sobre el FCD.

Influencia de la temperatura sobre la energía almacenada en el pavimento.

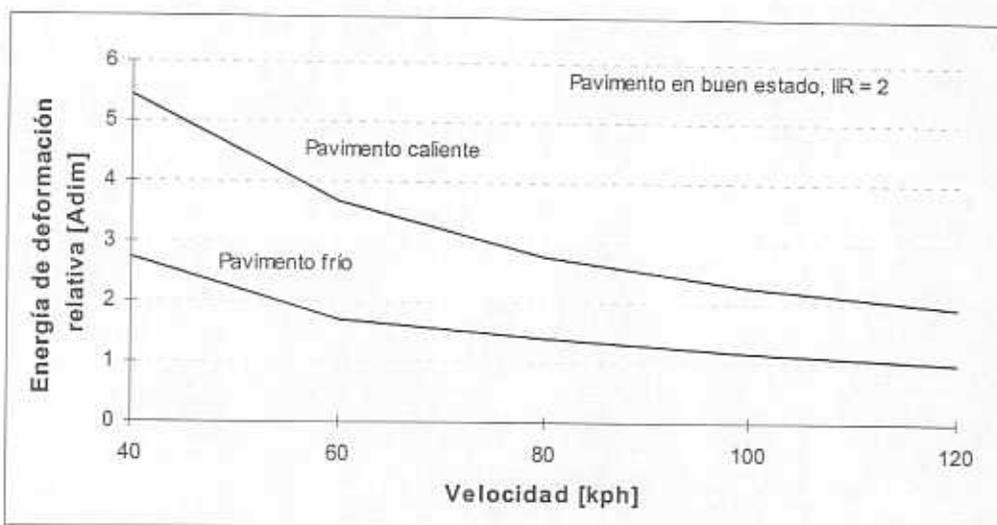
Como una medida de la respuesta del pavimento a los cambios en la temperatura de la superficie del mismo, el coeficiente de amortiguamiento del pavimento fue modificado para simular el efecto de dichos cambios. Esta variación se llevó a cabo considerando pavimentos en buenas, regulares y malas condiciones, Figuras 3.5(a), 3.5(b) y 3.5(c), respectivamente.

La respuesta del pavimento fue medida como una energía de deformación acumulada en el mismo, tomando en cuenta su comportamiento viscoelástico. De acuerdo con el modelo, esta energía toma en cuenta la respuesta dinámica del vehículo al perfil del pavimento, la cual es función de la velocidad del mismo. Los niveles presentados para la energía de deformación son sólo una indicación de los valores relativos entre las diferentes condiciones de operación presentadas.

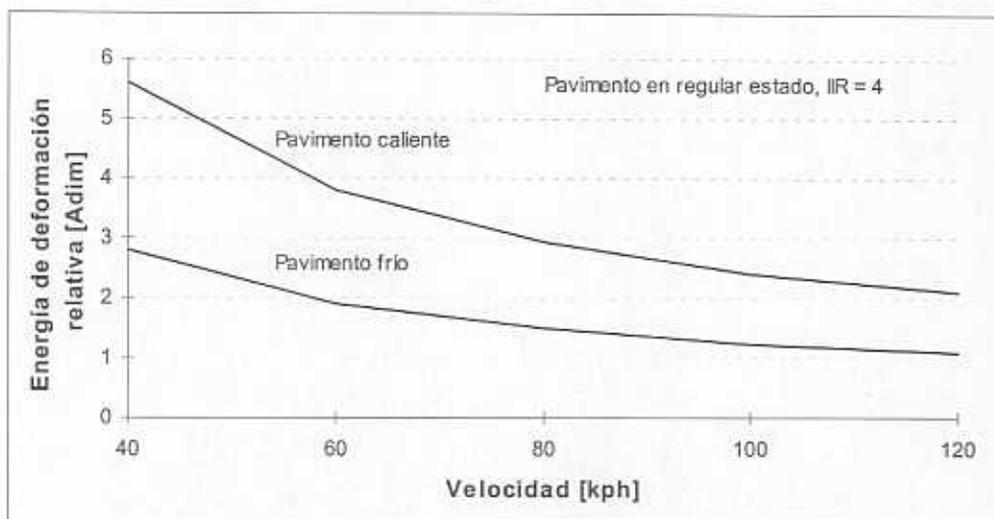
Como fue explicado antes para el caso del factor de carga dinámica, los valores para la energía de deformación del pavimento no pretenden ser cifras absolutas, sino más bien una representación cualitativa de lo que sucedería con la deformación del pavimento en caso de incrementar la temperatura, evaluado ello para tres niveles de IIR.

En la Figura 3.6 se presenta una condición crítica. Esto es, se simula un camión equipado con suspensión de hojas y llantas de costados rígidos, circulando con las llantas sobreinfladas sobre un pavimento caliente. Para fines de comparación, en esta misma figura se presentan también las curvas correspondientes a camiones equipados con suspensión de aire y de hojas, circulando con llantas radiales normalmente infladas sobre el mismo perfil

de pavimento (en mal estado) pero teniendo éste una temperatura relativamente baja. Esta figura muestra claramente que un camión que circule por un pavimento en mal estado, al mediodía, en un país tropical, aún a velocidades moderadas, puede constituir un efecto realmente mortal para el pavimento. Acerca de esto, se hace notar que estas condiciones de operación pueden corresponder a un país en vías de desarrollo.

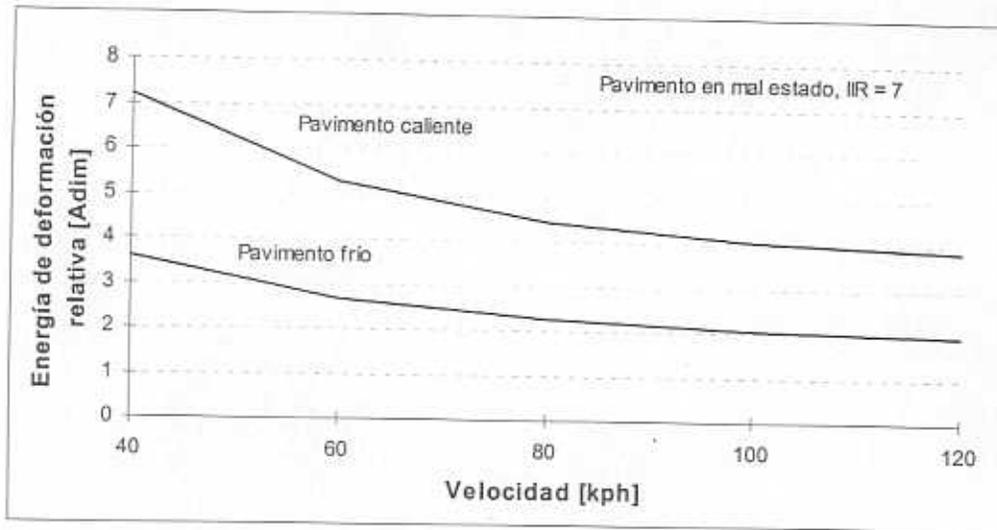


(a) IIR = 2 mm/m



(b) IIR = 4 mm/m

Figura 3.5. Influencia de la rugosidad del camino y de la temperatura sobre el nivel de energía almacenada en el pavimento



(c) IIR = 7 mm/m

Figura 3.5. Influencia de la rugosidad del camino y de la temperatura sobre el nivel de energía almacenada en el pavimento (cont.)

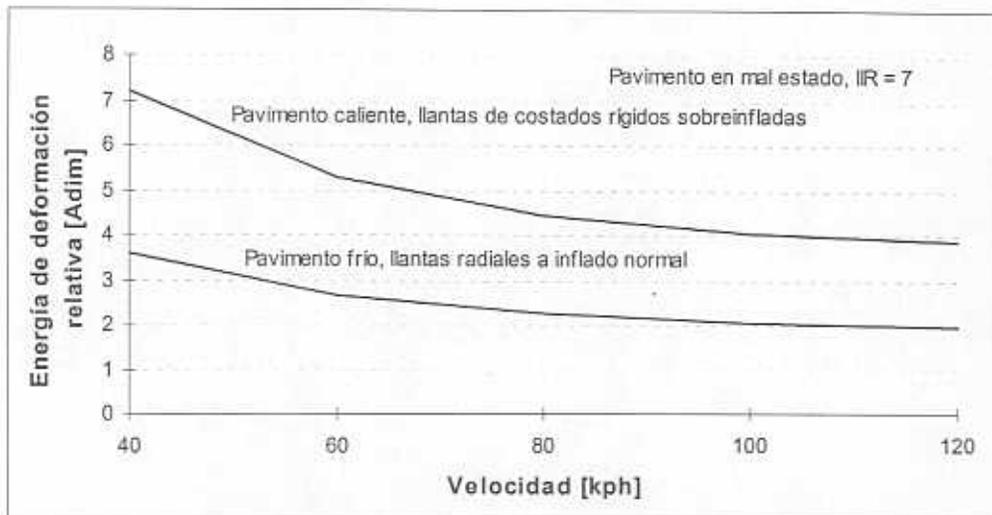


Figura 3.6. Influencia de la temperatura del pavimento. Condición crítica.

3.5 Conclusiones

La diferencia fundamental entre considerar la carga dinámica o la energía de deformación del pavimento, consiste en qué, mientras el factor de carga dinámica se incrementa con la velocidad, producto de la mayor excitación experimentada por los vehículos, la energía de deformación almacenada en el pavimento disminuye respecto a esta misma velocidad, estando relacionado este fenómeno con el carácter viscoelástico del pavimento. Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de considerar de manera conjunta los aspectos estáticos y dinámicos de ambos sistemas, para evaluar de manera realista la interacción vehículo pesado - pavimento.

El tipo de llanta afecta de manera sensible la respuesta del vehículo, de tal manera que esta variable constituye un elemento importante para evaluar la amigabilidad de los vehículos para con el pavimento. Al respecto, una llanta radial presentará un mayor amortiguamiento respecto al asociado a una llanta de costados rígidos. De la misma manera, una suspensión de aire tendrá mejores características dinámicas que una de hojas. Ciertamente las diferencias en la respuesta dinámica de las suspensiones y llantas y su efecto sobre el pavimento resultaron pequeñas; sin embargo, su importancia es fundamental en el potencial daño a la carretera, al tomar en cuenta el gran número de vehículos que circulan en algunas carreteras.

Por cuanto al sobreinflado de las llantas, éste repercute en una mayor rigidez de las llantas y en una elevación de las cargas dinámicas aplicadas por los vehículos sobre el pavimento. Esto es evidente sobre todo en el caso de las llantas radiales, mientras que en el caso de las llantas convencionales este efecto resulta menor.

La temperatura tiene un efecto dramático sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento, lo cual supone un mayor deterioro del mismo. El orden de magnitud de la energía a alta y baja temperatura implica que a altas temperaturas el deterioro pueda ser el doble o triple respecto a condiciones de pavimento relativamente frío. Esto, desde luego, sin alcanzar temperaturas en las que el hielo pudiera causar un daño aún mayor.

3.6 Referencias

1. Rico Rodríguez, A. y Del Castillo, H., 1977. "Pavimentos flexibles". Capítulo 9 en *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Vol 2. Limusa. México. Pp 99-204.
2. Hardy, M. S. A. y Cebon, D., 1993. "Response of Continuous Pavements to Moving Dynamic Loads". *Journal of Engineering Mechanics*. Vol 119(9). Pp 1762-1780.
3. Fancher P. S., Ervin R. D., Winkler C. B. y Gillespie T. D., 1986. *A factbook of the mechanical properties of the components for single-unit and articulated heavy trucks*. The University of Michigan. Transportation Research Institute.
4. Kenis, W. J., Sherwood, J. A. y McMahon, T. F., 1982. "Verification and application of the VESYS structural subsystem". *Memorias. 5th Int. Conf. on Struc. Design of Asph. Pav.* Vol 1. Pp 333-345.
5. Monismith, C. L., Sousa, J. y Lysmer, J., 1988. "Modern pavement design technology including dynamic load conditions". *SAE Conf. on Vehicle-Pavement Interaction*. SAE SP 765.
6. Ullidtz, P. y Larsen, B. K., 1983. "Mathematical model for predicting pavement performance". *Transportation Research Record*. No. 949. Pp 45-55.
7. Alpan, Y. y Baker, R., 1977. "The speed effect in pavement deflection". *Acta Tecnica*. Vol 85(12). Pp 11-28.
8. Harr, M. E., 1962. "Influence of vehicle speed on pavement deflections". *Memorias. Highway Research Board*. Vol. 41. Pp 77-82.
9. Kerr, A. D., 1964. "Elastic and viscoelastic foundation models". *Journal of Applied Mechanics*. ASME. Sept. 1964. Pp 491- 498.
10. Fryba, L., 1972. *Vibration of solids and structures under moving loads*. Noordhoff International Publishing.
11. Nogemi, T. y Lam, Y. C., 1987. "Two parameter layer model for analysis of slabs on elastic foundation". *J. Eng. Mech. ASCE*. Vol. 113(9). Pp 1279-1291.
12. Battiato, G., Verga, C. y Romca, G., 1977. "Viscoelastic deformations in a two layered paving system predicted from laboratory creep results". *Transportation Research Record*. No. 649. Pp 34-38.

13. Kausel, E. y Peek, R., 1982. "Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution". Bull. of Seismological Society of America. Vol. 72(5). Pp 1459-1481.
14. Kausel, E. y Roesset, J. M., 1981. "Stiffness matrices for layered soils". Bull. of Seismological Society of America. Vol 71. Pp 1743-1761.
15. Romero J. A. y Lozano, A., 1995. "Modelado matemático de la interacción dinámica vehículo pesado - pavimento". Reporte Interno. Instituto Mexicano del Transporte. 78 Pp.
16. Meirovitch L., 1986. *Elements of Vibration Analysis*. McGraw-Hill Int. Ed. New York.
17. Gillespie T. D., 1986. "The international road roughness experiment". Documento técnico 45. World Bank. Washington D.C.



4. Evaluación experimental de la interacción de vehículos pesados con el pavimento en México

4.1 Introducción

Existe una gran cantidad de literatura disponible sobre la interacción vehículo pesado (camiones)-pavimento. Entre los artículos más recientes que tratan con este problema desde el punto de vista experimental, se puede mencionar el publicado por Potter et. al. [4], quienes describen una serie de experimentos de medición de las cargas dinámicas para diferentes vehículos y de la repetibilidad espacial para cada caso. En ese trabajo se reporta que, en promedio, vehículos con suspensión de aire generan cargas dinámicas más pequeñas que las producidas por vehículos con suspensión de muelles. Karamihas y Gillespie [2] presentaron una revisión práctica de resultados experimentales de las más recientes investigaciones sobre la interacción vehículo-pavimento, en la que sugieren uniformizar la carga entre los ejes, evitar el sobreinflado de llantas y optimar el desempeño de la suspensión dinámica. En este último trabajo, se menciona que las suspensiones de aire pueden alcanzar desempeños cercanos a los óptimos con la apropiada selección del nivel de amortiguamiento. La importancia del estudio de la interacción del vehículo pesado con el pavimento se muestra por el amplio estudio que está realizando la *Federal Highway Administration* [1], el cual cubre mediciones de la rugosidad del pavimento, análisis de la dinámica vehicular con modelos de simulación por computadora, simulaciones mecánicas y pruebas en carreteras. Un punto importante de este estudio es la comparación de carreteras y condiciones de operación entre los E.U.A y Europa. Existe también un amplio reporte de las aproximaciones teóricas y experimentales para estudiar la interacción vehículo-pavimento, tales como las publicadas por el *National Cooperative Highway Research Program* [3] y la *Organization for Economic Cooperation and Development* [5].

No obstante la numerosa cantidad de artículos y la gran cantidad de variables analizadas en la interacción vehículo pesado-pavimento, la disponibilidad de datos experimentales de diferentes fuentes no permite hacer conclusiones definitivas para los diferentes ambientes de trabajo. Consecuentemente, deben realizarse más mediciones específicas para poder apreciar la magnitud del problema de deterioro del pavimento, tanto para tráfico urbano como para carreteras.

En este contexto, el Instituto Mexicano del Transporte inició un estudio de la interacción vehículo pesado-pavimento para, por un lado, proporcionar información al sector transporte sobre la evaluación del daño potencial por fatiga en los componentes del camión y sobre la carga que transporta; por otro lado, proporcionar información a funcionarios gubernamentales y administradores de carreteras para orientar la toma de decisiones sobre reglamentos para carga permitida por eje. Este último problema, es especialmente crítico debido a los gastos excesivamente altos en mantenimiento de carreteras.

Así, de los experimentos realizados, se cuenta con información de la relación que existe entre el tipo de suspensión y la respuesta de la carga transportada, así como sobre los niveles de esfuerzo en autotankes como función de la rugosidad del pavimento y las velocidades de viaje.

4.2 Evaluación experimental

El problema de la interacción vehículo-pavimento tiene dos aspectos: por un lado, existe la necesidad de evaluar el efecto que la rugosidad del pavimento tiene sobre el deterioro de carga y vehículo; y por el otro, la evaluación del efecto de las cargas dinámicas del camión sobre el daño en las carreteras. Por lo tanto, este estudio tiene dos enfoques: uno orientado a establecer una relación comparativa entre los niveles de vibración y deformación en tanques y camiones de plataforma como función del tipo de suspensión y su relación con la rugosidad del pavimento y velocidad del vehículo. El otro enfoque fue la evaluación de los niveles cualitativos de las cargas dinámicas producidas sobre el pavimento para los dos tipos de vehículos mencionados.

4.2.1 Medición de la deformación dinámica de tanques ante diferentes condiciones de rugosidad del pavimento.

Para llevar a cabo esta prueba, se colocaron galgas extensométricas en la sección media inferior de un tanque cilíndrico, tal y como se muestra en la Figura 4.1. El camión empleado estuvo equipado con suspensión de aire, tanto en el eje tándem del tractor, como en el del semiremolque, esto es, el tanque. El vehículo fue manejado a velocidad constante (80 km/hr) en tres tramos diferentes de carretera. Estos tramos fueron seleccionados atendiendo a la rugosidad característica del pavimento a partir de una evaluación cualitativa. Con base en esto, se clasificaron los diferentes tramos de carretera como condiciones buena, regular y mala. La superficie de una carretera de cuota fue clasificada como en buena condición, la superficie de una carretera libre fue clasificada como regular y la superficie

de rodamiento de una carretera secundaria fue considerada como en mala condición. En cada prueba realizada, se registró el peso neto de la carga, la presión de inflado de las llantas y las dimensiones generales de los vehículos.

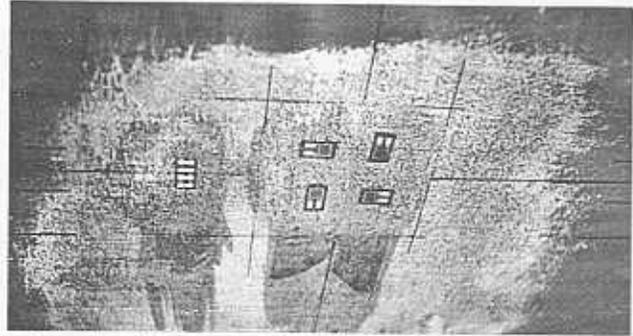


Figura 4.1. Tanque empleado para la prueba de deformación dinámica.
Arreglo de las galgas extensométricas

Durante el viaje de prueba, se tomaron mediciones de deformación cada 30 segundos con un acondicionador de señal y un colector de datos portátiles. Este último, sirvió para almacenar la señal de respuesta dinámica como función del tiempo, teniendo como referencia cero la condición estática del vehículo. Simultáneamente a las mediciones de deformación, se obtuvo el correspondiente espectro en frecuencia de la señal registrada, el cual también fue almacenado en el colector de datos. El diagrama de instrumentación se muestra en la Figura 4.2. Para cada prueba, se promediaron los espectros obtenidos y a partir de estos valores, se calculó la raíz del valor cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés). La Figura 4.3 muestra el nivel de deformación RMS para cada condición de los tramos carreteros recorridos.

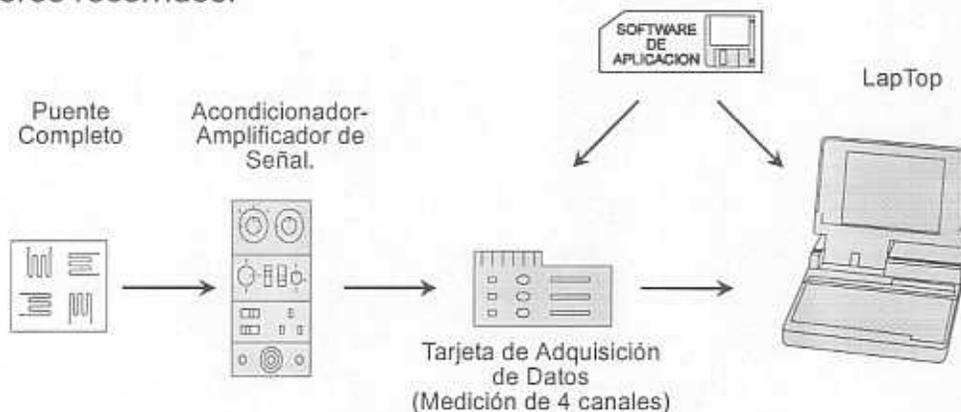


Figura 4.2. Diagrama de instrumentación para la medición de deformaciones.

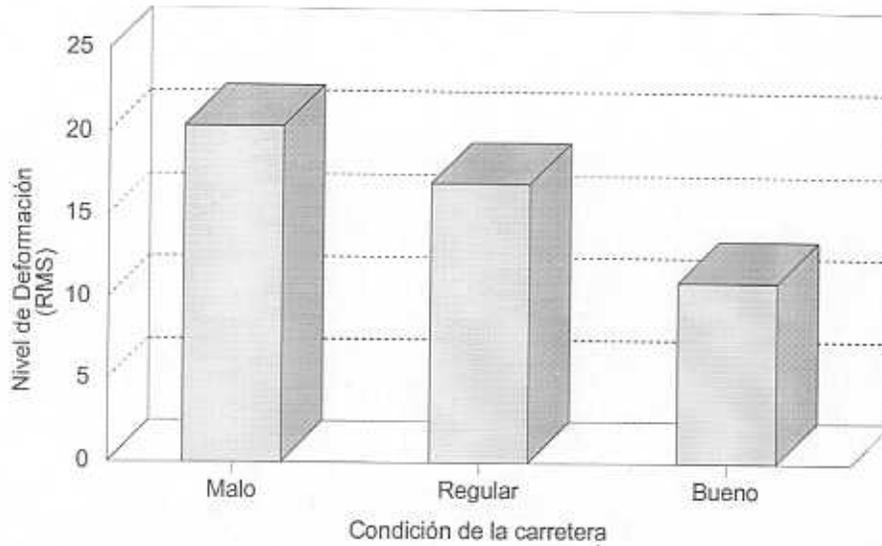


Figura 4.3. Niveles de deformación del tanque, bajo diferentes condiciones de la superficie de la carretera, con el vehículo de prueba viajando a velocidad constante.

4.2.2 Medición de la deformación dinámica de una plataforma como función de la velocidad.

En este caso, se utilizó un camión con plataforma cuyo eje tándem trasero estaba equipado con una suspensión de muelles. El eje trasero del camión se instrumentó con galgas extensométricas, y la señal resultante fue registrada y procesada con el mismo equipo descrito en la sección anterior, como se muestran en la Figura 4.4. En cada sección de las carreteras de prueba, clasificada bajo el mismo criterio antes adoptado (buena, regular y mala), se transitó a diferentes velocidades y niveles de carga en la plataforma y se registraron los datos para las diferentes condiciones del pavimento. En cada prueba se registraron los niveles de deformación en el dominio del tiempo y se obtuvo el espectro de frecuencia cada 30 segundos. Se calcularon los niveles promedio de estos espectros de frecuencia y sus valores RMS fueron graficados con respecto a la velocidad.

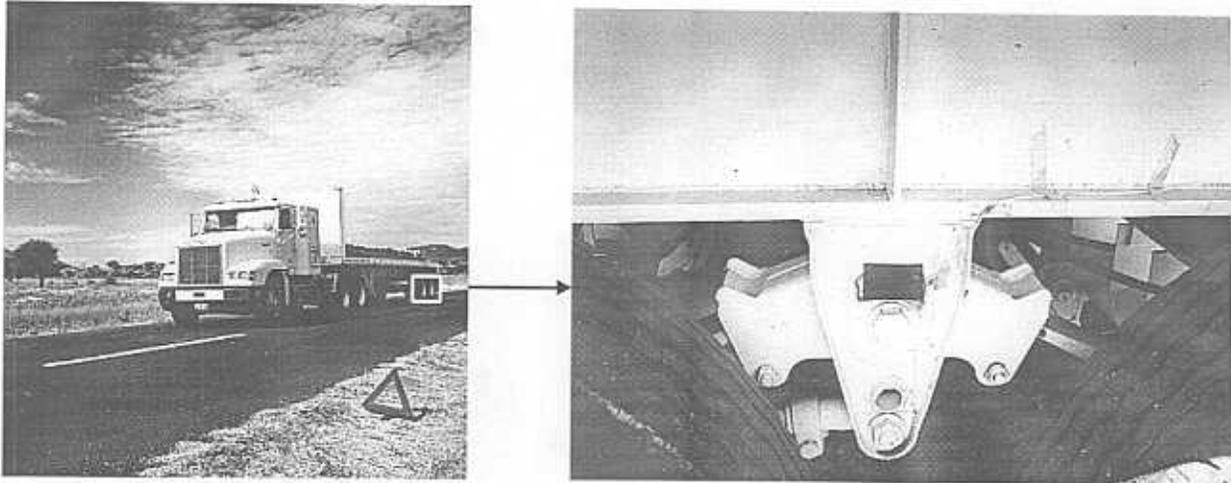
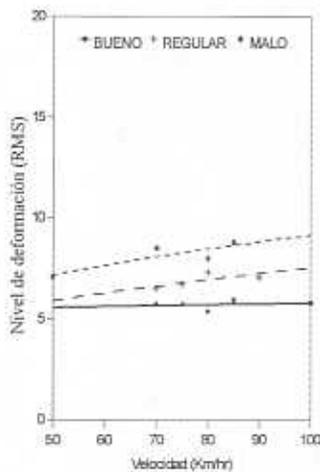
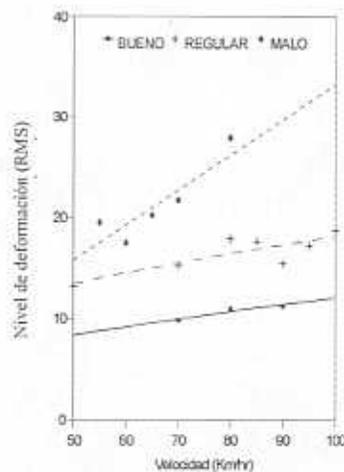


Figura 4.4. Posición de las galgas extensométricas en el camión con plataforma empleado en las pruebas.

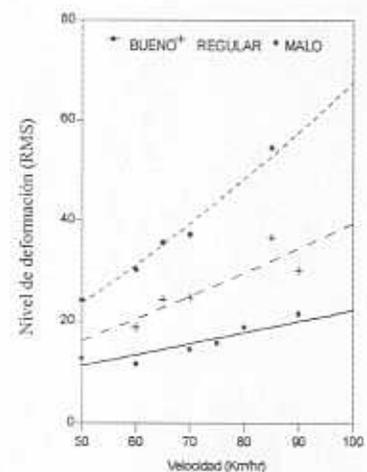
La Figura 4.5(a) muestra la relación entre el nivel de deformación RMS obtenido, con la plataforma descargada y con el camión viajando a diferentes velocidades. La Figura 4.5(b) presenta la relación anterior, para la plataforma a media carga y la Figura 4.5(c) corresponde al caso de la plataforma totalmente cargada.



(a) Plataforma descargada.



(b) Plataforma a media carga.

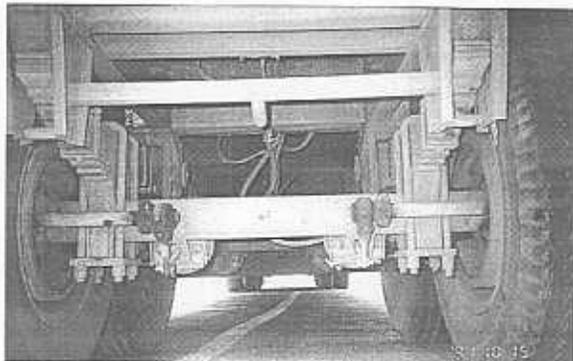


(c) Plataforma cargada completamente.

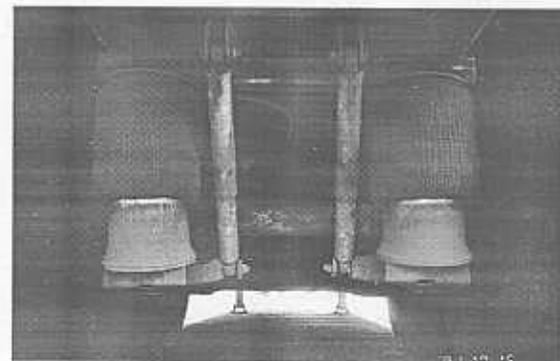
Figura 4.5. Nivel de deformación en el eje trasero para diferentes tipos de carreteras y velocidades.

4.2.3 Comparación del nivel de vibración en un vehículo equipado con diferentes tipos de suspensión.

Con este experimento se muestra la relación que existe entre la energía transmitida a la carga transportada con la rugosidad del pavimento, para camiones similares equipados con diferente tipo de suspensión. Las suspensiones probadas fueron una de aire y una de muelles (Figura 4.6). En este caso se mantuvo la rugosidad de la carretera como constante, por lo que todas las pruebas se evaluaron en la misma carretera bajo condiciones operativas similares; más aún, los camiones transportaron el mismo tipo de carga, el conductor fue la misma persona y la velocidad de prueba se mantuvo constante (80 km/hr). La instrumentación experimental se muestra en la Figura 4.7.



Muelles



Aire

Figura 4.6. Tipos de suspensión probadas.

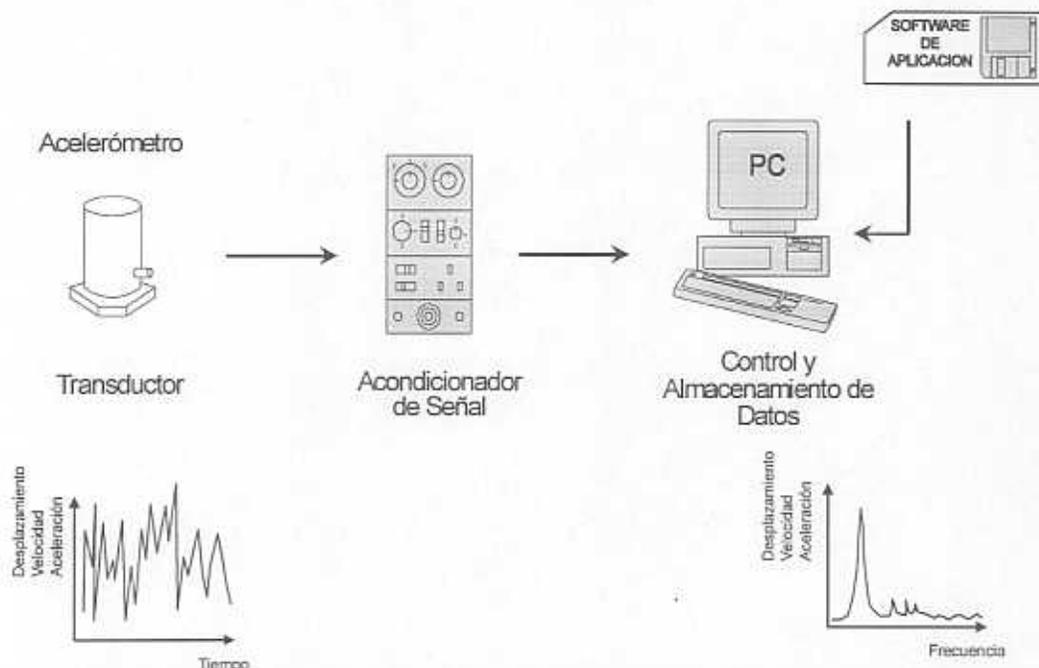


Figura 4.7. Instrumentación empleada para mediciones de vibración.

Los valores RMS de los espectros de aceleración, producidos por las suspensiones de muelles y aire, se muestran en la Figura 4.8. En esta figura, el término de aceleración relativa se refiere a los niveles de aceleración registrados para uno y otro tipo de suspensión, respecto a la misma referencia.

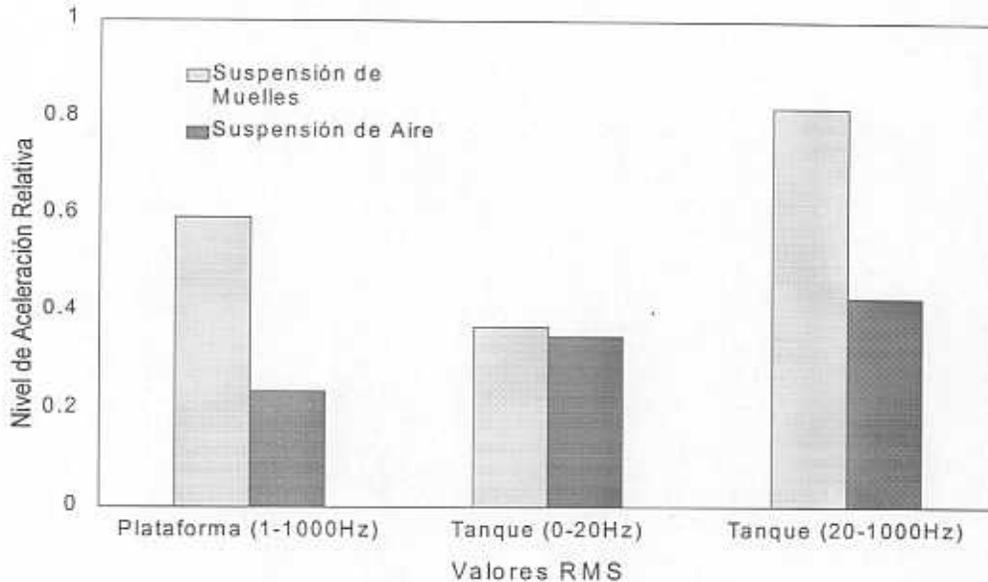


Figura 4.8. Niveles Relativos de aceleración para una suspensión de aire y una de muelles.

4.2.4 Variación del nivel de vibración con la velocidad.

Esta prueba relaciona el nivel de vibración de un semiremolque tipo plataforma, en un tramo de carretera con un nivel de rugosidad constante, con la velocidad de viaje, para tres niveles de carga. El nivel de vibración de la plataforma fue medido mediante un acelerómetro fijo exactamente sobre la suspensión trasera, como se muestra en la Figura 4.9. El procesado de la señal es similar al mostrado en la Figura 4.7. Las pruebas fueron realizadas a velocidades de 20, 50 y 80 km/hr y los espectros de frecuencia fueron registrados cada 15 segundos. Con estos datos se obtuvo un espectro promedio y su nivel de aceleración RMS fue graficado contra la velocidad. La distancia de prueba en la carretera fue lo suficientemente larga (10 km) para obtener el mismo número de espectros para cada velocidad.

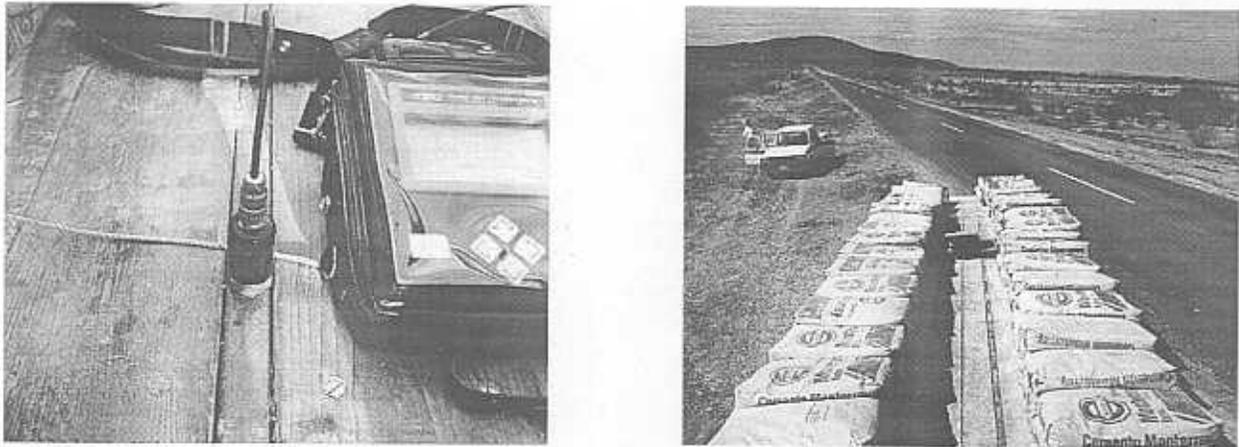


Figura 4.9. Ubicación del acelerómetro en la plataforma de prueba.

La Figura 4.10 muestra el valor RMS de la aceleración, obtenida de sus espectros promediados, para diferentes velocidades y condiciones de carga.

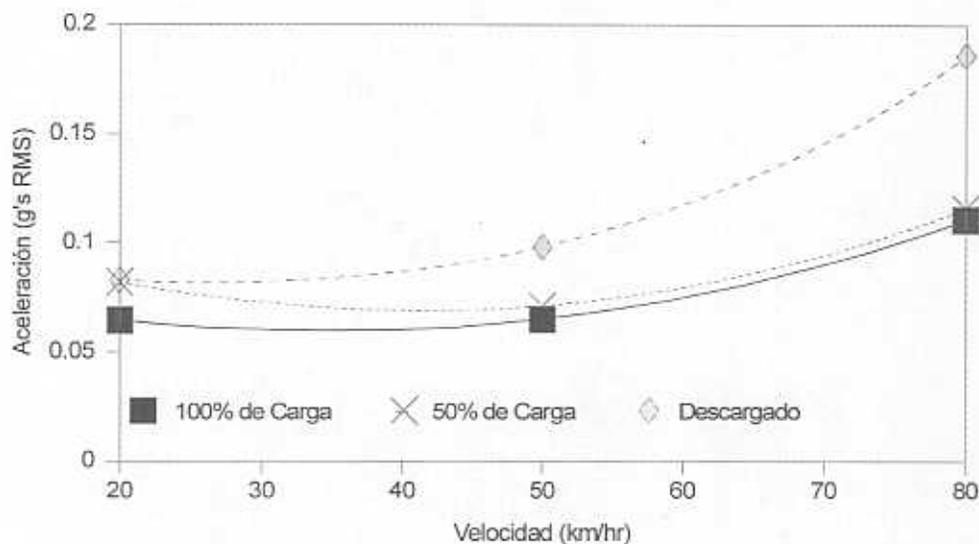


Figura 4.10. Nivel de vibración en la plataforma para diferentes velocidades y cargas.

4.2.5 Medición del nivel de impacto sobre el pavimento como función de la velocidad.

Para el desarrollo de estas pruebas se utilizó un sensor de impacto de tipo resistivo desarrollado en el Instituto Mexicano del Transporte. Este sensor consiste de una placa de acero rectangular con galgas extensométricas

distribuidas uniformemente en toda la placa. Mediante otra placa de acero ranurada, se proporciona protección a las galgas y cables. Cuando este conjunto de placas se comprime, la resistencia de las galgas se modifica como respuesta a la carga aplicada (Figura 4.11).

La longitud del sensor fue 0.8 m por 0.15 m de ancho, colocándose dos sensores espaciados un metro a lo largo del camino. Los datos registrados se procesaron y guardaron usando un arreglo instrumental que incluyó un convertidor A/D, un colector de datos para PC y un osciloscopio.

Es importante resaltar que el sistema descrito anteriormente, no pretende actuar como dispositivo de pesaje dinámico, sino sólo registrar fuerzas de impacto relativas, con el propósito de comparar los diferentes tipos de suspensión, condiciones de carga y velocidad.

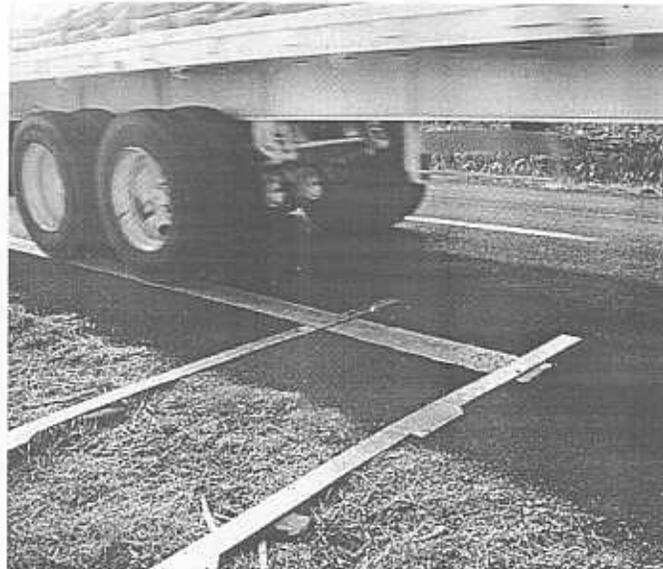


Figura 4.11. Dispositivo de impacto sobre la carretera.

Utilizando el semiremolque tipo plataforma y el sensor de impacto colocado como se muestra en la Figura 4.11, se llevaron a cabo una serie de pruebas a tres velocidades y tres niveles de carga. La prueba de cada combinación carga-velocidad, fue realizada seis veces, de tal forma que se obtuvo un valor promedio para cada tipo de condiciones.

La Figura 4.12 muestra una señal de salida típica para el dispositivo de impacto, para una velocidad de 50 km/hr y 100% de carga. Los valores de impacto mostrados corresponden, de izquierda a derecha, al eje frontal y a los ejes tándem del tractor y de la plataforma. La Figura 4.13 muestra los valores de impacto relativos para estas pruebas.

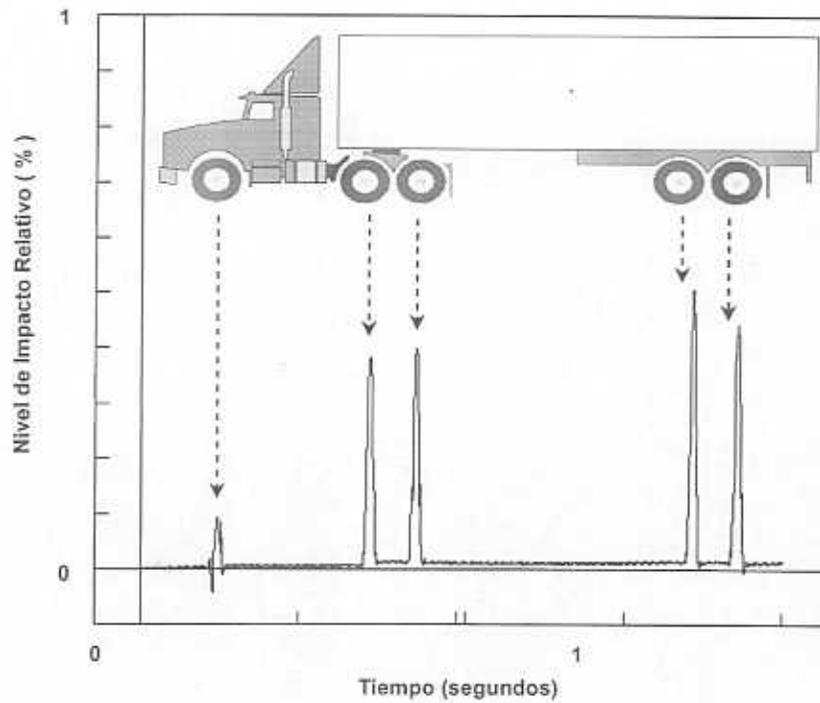


Figura 4.12. Señal de salida típica del sensor de impacto.

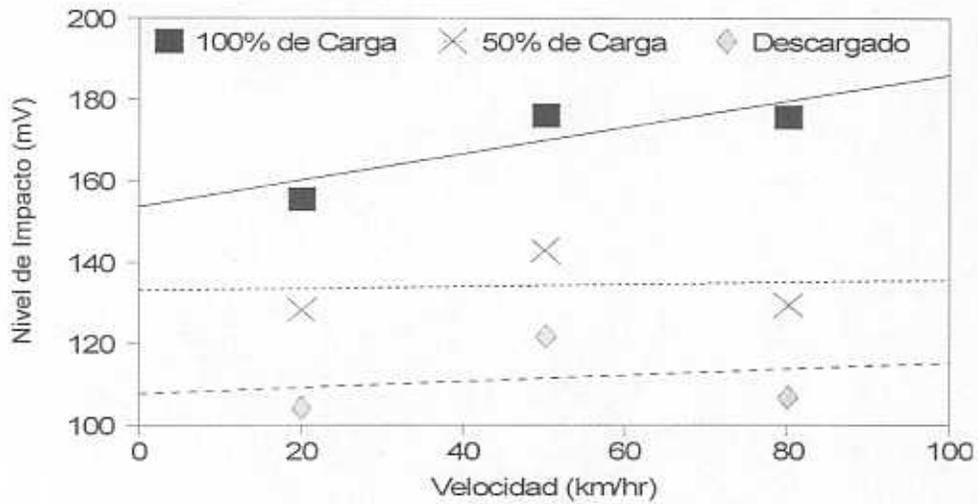


Figura 4.13. Nivel de impacto en el sensor sobre el pavimento, para diferentes velocidades y cargas.

4.2.6 Nivel de impacto sobre el pavimento respecto al tipo de suspensión.

Empleando el mismo dispositivo de impacto descrito en la prueba anterior, se realizaron mediciones de un conjunto vehicular tractor-semiremolque-remolque. En este caso, se emplearon dos vehículos de características análogas, uno equipado con suspensión de aire y el otro con suspensión de muelles. Se realizaron viajes a tres velocidades diferentes, con el tanque semiremolque totalmente cargado, mientras que el del remolque iba descargado.

La Figura 4.14 muestra una gráfica típica de la señal del sensor de impacto, correspondiente al vehículo con suspensión de muelles, viajando a 70 km/hr. Los valores promedio del impacto para las diferentes cargas, velocidades y tipos de suspensión se muestran en la Figura 4.15. Es necesario notar que los valores mostrados en la figura dan una referencia del comportamiento de los vehículos empleados, que permite una comparación entre ellos. Sin embargo, estas cantidades no marcan el valor absoluto del nivel de impacto sobre el pavimento.

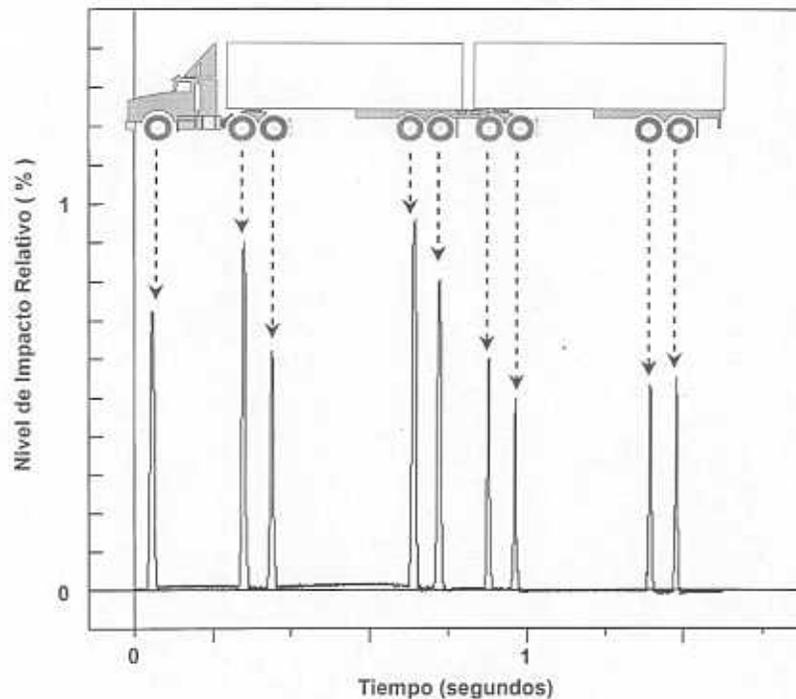


Figura 4.14. Señal de salida típica del dispositivo de impacto.

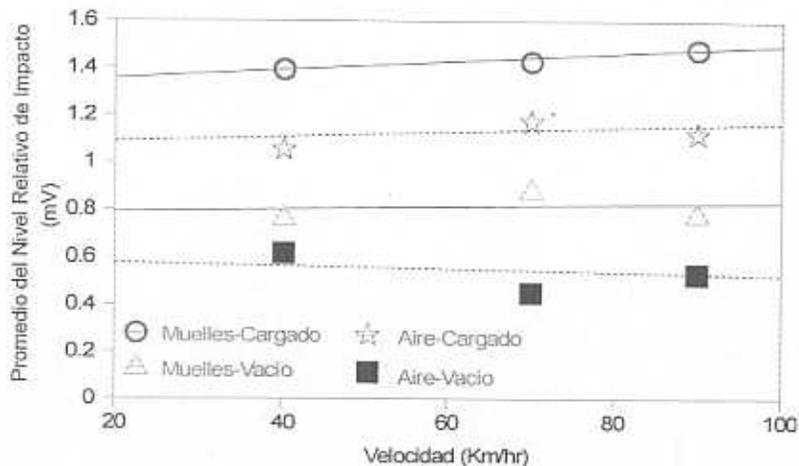


Figura 4.15. Valores de impacto para diferentes cargas, velocidades y tipo de suspensión.

4.3 Discusión de resultados

De los valores de nivel de deformación en el tanque del semiremolque y de su relación con la rugosidad del pavimento, es posible observar que la deformación del tanque varía claramente con las condiciones de la carretera. Tomando como referencia el nivel de deformación medido para una carretera en buenas condiciones, se tienen valores de deformación del doble del de referencia, cuando los tanques viajan en una carretera en malas condiciones.

De los resultados presentados sobre las variaciones del nivel de deformación con la velocidad, se puede establecer la creciente influencia que ésta tiene con el incremento del nivel de carga. Sin embargo, con el tanque descargado, no se observaron variaciones importantes en el nivel de deformación con la variación de la velocidad.

Para una rugosidad de pavimento dada, parece que el nivel de vibración de la carga transportada por el camión varía con el tipo de suspensión. Para la prueba realizada, se registró un decremento en el nivel de vibración en el camión equipado con suspensión de aire, comparado con las mediciones del camión con suspensión de muelles. Este efecto fue más notable para frecuencias mayores de 20 Hz. La reducción de niveles de vibración también se presentaron, aunque en un menor grado, a frecuencias menores de 20 Hz.

Para un tipo de suspensión, condiciones de carretera y velocidad dadas, esta última parece jugar un papel importante en el nivel de vibración del camión cuando éste viaja a más de 50 km/hr. Como se mencionó

previamente, esta influencia es más notable para el camión en condiciones de carga completa. Para la prueba reportada aquí, no se observaron niveles importantes de vibración a velocidades menores a los 50 km/hr y tal parece que las vibraciones ocurren principalmente entre 1 y 20 Hz.

En relación con el nivel de impacto sobre el pavimento, los resultados sugieren que la influencia de la velocidad se incrementa con el nivel de carga transportada. Asimismo, según los datos reportados, la suspensión de aire mostró un comportamiento más "amigable" para el pavimento que la de muelles, especialmente en condiciones de carga total y a altas velocidades.

4.4 Conclusiones

La rugosidad del pavimento tiene una influencia directa en los niveles de deformación a los que son sometidos los vehículos, de tal manera que esta rugosidad afecta la vida útil del camión e incrementa sus costos de mantenimiento.

Los datos presentados indican que la sobrecarga y el manejo a altas velocidades por carreteras con una mala condición superficial, es decir, con una rugosidad elevada, incrementan de manera importante los costos de mantenimiento y reducen la vida útil de los vehículos. Asimismo, que estas condiciones de operación también representan un potencial alto de daño para la carga transportada.

Los resultados aquí mostrados indican que las suspensiones de aire son más amigables con la carga y con la carretera; sin embargo, debe tenerse gran cautela al extender esta afirmación más allá de las pruebas aquí descritas, debido al gran número de variables involucradas en la operación de ambos tipos de suspensión, en donde el amortiguamiento juega un papel primordial en su desempeño. De esta manera se identifica la necesidad de efectuar pruebas de vehículos equipados con suspensiones de aire, circulando con amortiguadores fallados en pavimentos deteriorados.

Por cuanto al dispositivo desarrollado para la detección de la carga dinámica, éste proporcionó una buena repetibilidad, quedando como trabajo futuro efectuar mediciones en campo con otros tipos de suspensiones y llantas.

4.5 Referencias

1. Federal Highway Administration 1994. "Vehicle Dynamics. Truck-Pavement Interaction Research Areas of Interest", Internal Document, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, Virginia.
2. Gillespie, T. y D., Karamihas, S. M. 1994. "Truck and Pavement Wear: Findings from New Research". UMTRI Research Review, No. 6, Vol. 24, 1-25.
3. Gillespie, T. D.; Karamihas, S. M.; Sayers, M. W.; Nasim, M. A. Hansen, W.; Ehsan, N. y Cebon, D. 1993. "Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance". Report 353, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
4. Potter, T. E. C.; Collop, A. C.; Cole, D. J. y Cebon, D. 1994. "A34 Mat Tests: Results and Analysis", Report No. CUED/C-MECH/TR 61, University of Cambridge, Cambridge.
5. Sweatman, P. Et. Al. 1992. "OECD Expert Group. Dynamic Loading of Pavements", Report IRRD No. 847714, Organisation for Economic Cooperation and Development, Road Transport Research, Paris.

5. Interacción vehículo pesado – pavimento. Potencial de ahorro en el deterioro de las carreteras por efecto de la carga dinámica de vehículos pesados.

5.1 La infraestructura carretera de México

México cuenta actualmente con una red carretera de alrededor de 300,000 km. de longitud [1]. De esta longitud total, cerca de 50,000 km. forman parte de la red federal de caminos pavimentados, correspondiendo 45,700 a carreteras libres y el resto a caminos de cuota [2]. En 1993, por esta red se transportaron 370 millones de toneladas de carga, que representaron 140 billones de ton-km [3]. La importancia de la red de caminos pavimentados se puede apreciar considerando que en ese año, la actividad económica asociada al transporte representó el 5.4% del producto interno bruto (PIB) de México [4]. A su vez, la actividad del grupo automotor de carga representó el 44.1% del total reportado para el sector transporte. Así, tomando en cuenta las cifras anteriores, se puede estimar que la interacción vehículo pesado - pavimento se dio en un contexto económico de aproximadamente el 2.3 % del PIB.

Como se detallará más adelante, el estado superficial de las carreteras tiene una importancia fundamental en las estimaciones que se hagan con referencia a la interacción de los vehículos pesados con el pavimento. De información publicada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) [5], se establece que el 40% de la red carretera se encuentra en condiciones aceptables, mientras que el 60% presenta problemas en la calidad de su superficie de rodamiento. Así, en la Figura 5.1 se muestra la distribución nacional del estado de deterioro superficial que presentaba la red carretera pavimentada en 1990. Para 1997 la distribución geográfica de los caminos considerados en buenos y malos, probablemente ha cambiado. Sin embargo, se estima que el porcentaje de carreteras con problemas en su superficie de rodamiento se mantiene en 60% [6].

Por lo que se refiere a los vehículos, la SCT lleva a cabo el estudio de campo para conocer las condiciones reales en las que se realiza el transporte de carga en la red carretera más importante. De esta manera, en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se han llevado a cabo estudios de pesos y dimensiones de los vehículos de carga que circulan sobre las carreteras nacionales [7], lo que ha permitido conocer el peso y dimensiones de los diferentes vehículos de carga que circulan por la red de carreteras, registrar el tipo y cantidad de la carga transportada, conocer el origen y

destino de la misma así como conocer detalles del aforo de vehículos de carga que transitan por la red.



Figura 5.1. Estimación del estado superficial de la red carretera pavimentada.

Algunos resultados particulares del estudio de pesos y dimensiones, aquellos relacionados con la operación del autotransporte de carga, indican que las cinco configuraciones vehiculares indicadas en la Tabla 5.1, son las que transportan prácticamente el total de la carga que circula por la red carretera [8]. En esa tabla se indica la participación de estos vehículos en el transporte nacional de carga. Como era de esperarse, los vehículos más pequeños (camiones unitarios, C2, C3) tienen una participación importante en número, pero los más pesados (articulados, T3-S2, T3-S3, T3-S3-R4) tienen una participación mayor, tanto en el tonelaje transportado como en su cobertura territorial.

Tipo de Vehículo	% de vehículos	% de la carga (ton)	% de Ton-km
Tipo C2	49.4	13.1	8.4
Tipo C3	18.1	18.0	15.5
Tipo T3-S2	15.3	31.9	35.7
Tipo T3-S3	14.3	34.8	37.9
Tipo T3-S2-R4	1.5	2.2	2.5
Otros	1.4	-	-

Tabla 5.1. Participación en el manejo de la carga, por tipo de vehículo para datos de 1993 [8].

Tipo de Vehículo	Porcentaje de carga transportada						
	0%	0-20	20-40	40-60	68-80	80-100	100%
Tipo C2	46.0	8.6	.8.2	7.5	13.3	5.3	11.9
Tipo C3	36.0	3.5	9.9	6.3	7.0	14.1	23.2
Tipo T3-S2	29.0	6.1	11.8	8.9	16.0	10.2	18.0
Tipo T3-S3	30.0	5.2	7.6	3.1	3.8	4.2	47.1
Tipo T3-S2-R4	30.0	2.8	6.3	9.5	4.9	5.3	41.2

Tabla 5.2. Distribución del porcentaje de ocupación vehicular [9].

La Tabla 5.2 muestra la distribución relativa del nivel de ocupación de las configuraciones vehiculares más comunes [9]. De esta tabla se aprecia que los vehículos más ligeros tienen un mayor porcentaje de viajes en vacío y que a los más pesados se tiende a sobrecargarlos.

De estas dos tablas, puede calcularse conservadoramente, que 21% de los vehículos pesados que circulan por la red carretera pavimentada viajan con sobrecarga, variando sensiblemente los niveles de sobrecarga con el tipo de vehículo.

Para contar con una cifra de número de vehículos que pudieran estar equipados con suspensiones de aire, se tomó como referencia la edad de los mismos. En la Figura 5.2 se muestra la edad promedio de los vehículos de carga que fueron encuestados en el estudio de pesos y dimensiones entre 1991 y 1993 [10]. De esta información parece desprenderse que los vehículos articulados más grandes son los que tienen más posibilidad de estar equipados con suspensiones más amigables, de aire.

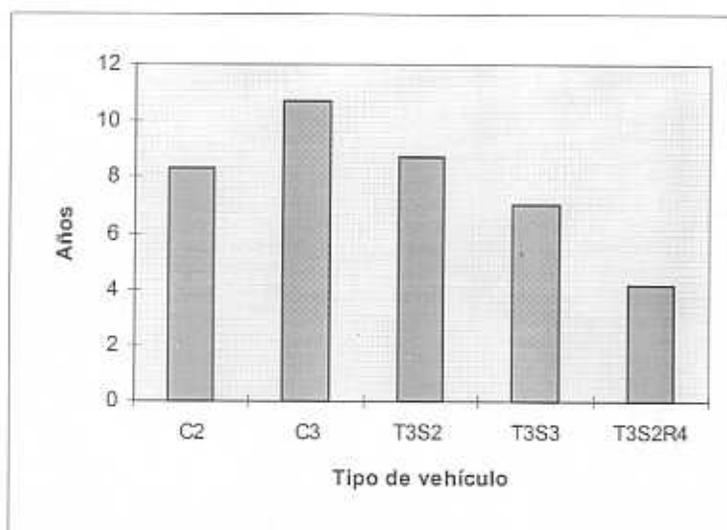


Figura 5.2. Edad promedio de los vehículos de carga más comunes en México, según encuestas realizadas entre 1991 y 1993 [10].

Por lo que se refiere a los niveles de sobrevelocidad que se presentan en la red carretera en México, en la Tabla 5.3 se muestran resultados típicos de mediciones en campo [11]. De aquí se desprende que en los tramos carreteros muestreados, en promedio, el 50% de los vehículos de carga exceden en un 35% la velocidad máxima permitida.

Tramo	Límite de velocidad (km/h)	Velocidad mínima (km/h)	Mediciones velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)	Vehículos de carga que exceden el límite (%)
1	80	54	115	84	60
2	80	30	120	84	57
3	80	60	120	81	58
4	100	65	141	96	43
5	40	46	67	58	67
6	60	56	75	69	57
7	40	34	48	42	53
8	80	50	96	78	48
9	60	33	65	55	35
10	80	55	105	79	48
11	80	50	105	79	47
12	70	30	95	58	32

Tabla 5.3. Distribución de velocidad típica en tramos de la red carretera federal

5.2 Interacción vehículo pesado-pavimento

Se identifican dos enfoques por cuanto al análisis de la interacción vehículo pesado - pavimento. Por un lado, se requiere caracterizar el daño que sufre la carretera por el paso de los vehículos pesados, y por el otro, evaluar el deterioro de los vehículos y la carga que transportan, en función del estado superficial de la carretera. En ambos casos, la importancia económica del problema es alta, tanto para el transportista como para las entidades encargadas del mantenimiento de las carreteras. En el IMT se han llevado a cabo investigaciones que, de acuerdo a las limitaciones locales, han permitido estimar cualitativamente el efecto nocivo que tienen: la sobrecarga, la sobrevelocidad y el tipo de suspensión de los vehículos pesados, sobre las tasas de deterioro de las carreteras. También se ha evaluado el efecto que tiene la rugosidad de la carretera en el nivel de esfuerzos que se presenta en la suspensión del vehículo.

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos que permiten, junto con los datos sobre el estado y condiciones de operación de la red carretera en México, cuantificar en órdenes de magnitud, más que en cifras exactas, la posible reducción de la velocidad de deterioro de la red carretera nacional, con la observancia de prácticas operativas y utilización de equipo *amigable* para con la carretera. Lo anterior, sin detrimento del carácter eminentemente comercial del transporte de carga.

Nivel de deformación del pavimento vs sobrecarga del vehículo. A partir de modelos matemáticos de los camiones de carga más comunes en México, y de un modelo de deformación del pavimento [12], en la Figura 5.3 se muestra la variación de la energía de deformación que se acumula en el pavimento, por el paso de diversos tipos de vehículos de carga circulando en carreteras mexicanas.

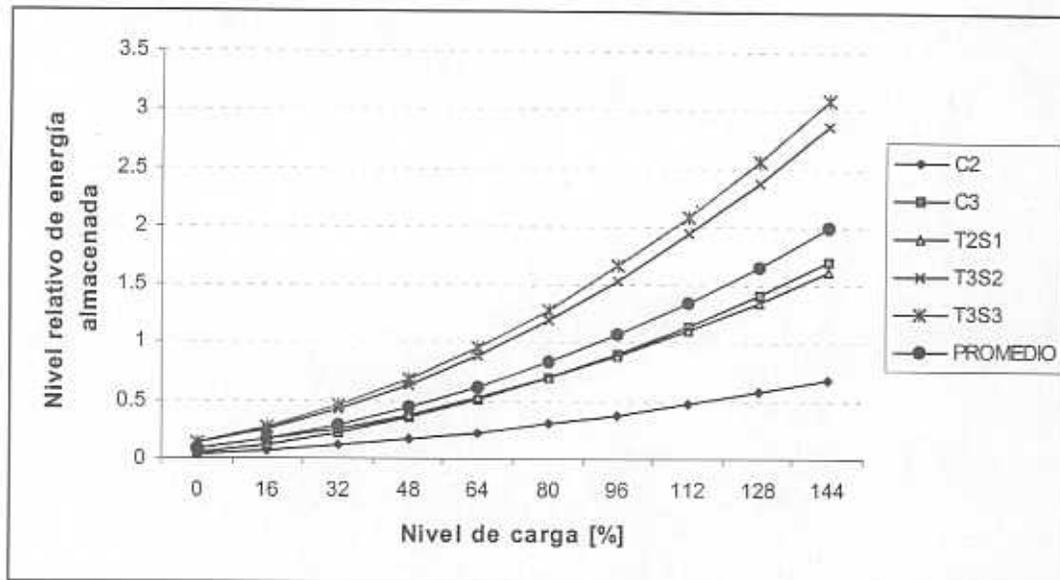


Figura 5.3. Energía de deformación normalizada al 100% de la carga promedio Vs porcentaje de nivel de carga útil del vehículo

Tomando como base la deformación correspondiente a la experimentada por el pavimento cuando los vehículos viajan a su carga nominal, de acuerdo al reglamento de pesos y dimensiones vigente en México, puede establecerse que si los vehículos viajan con un 20% de sobrecarga se transmite en promedio, 43% más de energía de deformación al pavimento, asumiéndose esta energía como estrechamente ligada con el deterioro del mismo.

Nivel de deformación del pavimento vs rugosidad de la carretera. De acuerdo con evidencia experimental [13], los modelos matemáticos desarrollados tanto para vehículos como para el pavimento, reportan que una carretera en mal estado, acumula mayor cantidad de deformación que una carretera en buen estado, como lo ilustra la Figura 5.4. Aquí puede observarse que para un IIR de 6.75 mm/m, valor que corresponde a una carretera en mal estado, se transmitiría un 30% más de energía de deformación al pavimento, que la que se transmitiría a una carretera en buen estado con un IIR de 2.25 mm/m.

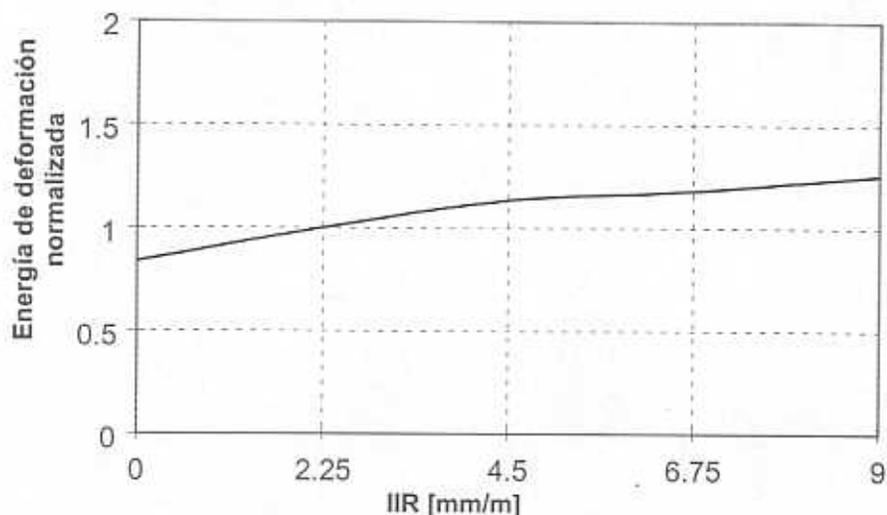


Figura 5.4. Energía de deformación del pavimento, normalizada al valor registrado para una carretera en buen estado (IIR = 2.25) Vs rugosidad de la carretera (IIR, expresado en mm/m).

Nivel de impacto sobre el pavimento vs velocidad. Estudios experimentales en carreteras nacionales han permitido establecer una relación cualitativa del nivel de impacto dinámico sobre el pavimento y su variación con la velocidad y el nivel de carga del vehículo [14]. De los resultados de estos estudios, es claro que el valor del impacto dinámico sobre el pavimento aumenta con la velocidad y el nivel de carga del vehículo, como se muestra en la Figura 5.5. En este caso, tomando como referencia el nivel de impacto registrado para un vehículo tipo T3-S2 (3 ejes en el tractor, 2 ejes en el semiremolque), a su nivel de carga máxima según el reglamento mexicano correspondiente, viajando a 80 km/h en una carretera con un IIR de 3.5 mm/m, se tendría un aumento promedio de 7.5% en la carga dinámica sobre el pavimento si el vehículo viajara a 100 km/h.

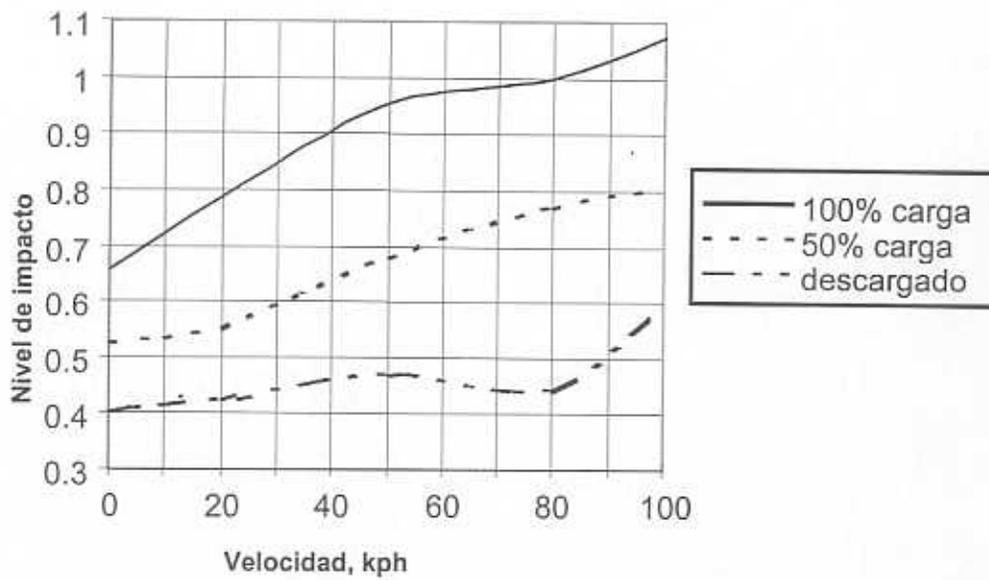


Figura 5.5. Nivel de impacto sobre el pavimento, normalizado al registrado a 80 km/h vs velocidad en km/h

Nivel de impacto sobre el pavimento vs tipo de suspensión. El tipo de suspensión del vehículo pesado tiene un papel fundamental en el potencial de daño al pavimento, representado por estos vehículos, al afectar sensiblemente la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento del camino.

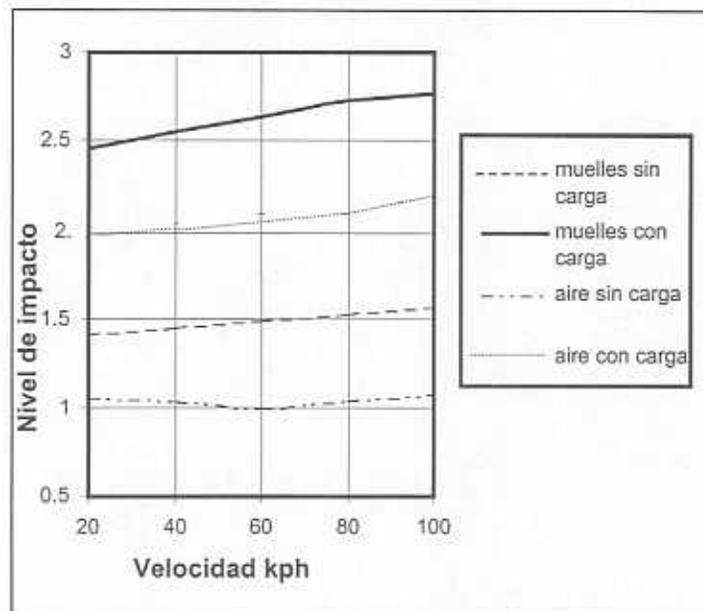


Figura 5.6. Nivel de impacto sobre el pavimento, normalizado al registrado a 60 km/h para una suspensión de aire sin carga Vs velocidad dada en km/h.

Tomando en cuenta los tipos de suspensiones para vehículos pesados más comunes en el mercado en México, fueron llevadas a cabo mediciones comparativas del impacto dinámico sobre el pavimento, producido por una suspensión de aire y una de muelles, del tipo *walking beam* (de balancín). Los resultados de estas mediciones se muestran en la Figura 5.6. Es muy importante señalar que estos resultados se obtuvieron para un solo tipo de vehículo y un solo valor de IIR, por lo que de ninguna manera constituyen una evaluación del desempeño o *amigabilidad* de las suspensiones. Sin embargo, sí permitieron comparar, cualitativamente, los niveles de impacto sobre el pavimento que tendrían dos tipos de suspensiones operando bajo las mismas condiciones. Con base en estas mediciones fue posible establecer la existencia de variaciones de hasta el 20% en el nivel de impacto dinámico producido sobre el pavimento, por efecto de los dos tipos de suspensiones estudiadas.

Nivel de esfuerzo en la suspensión vs nivel de carga, velocidad y rugosidad de la carretera. El deterioro del vehículo y la carga que transporta, también se ven afectados por el estado superficial de la carretera.

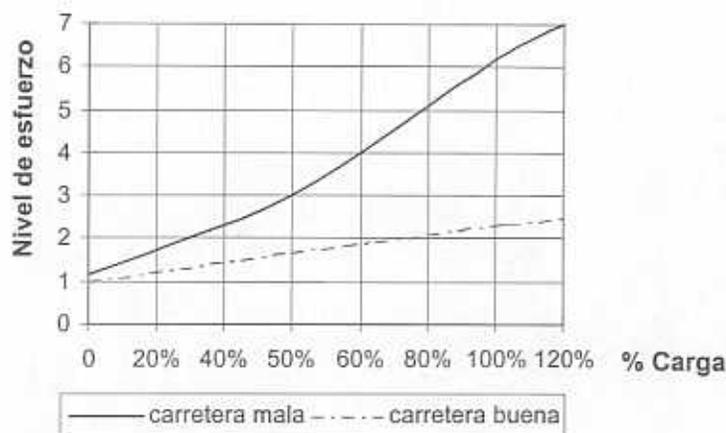


Figura 5.7. Nivel de esfuerzos en la suspensión vs % de nivel de carga.

Valores normalizados al valor de esfuerzo registrado con el vehículo descargado y circulando por una carretera en buen estado a una velocidad de 70 km/h.

De las mediciones efectuadas se estima que a valores nominales de carga, el circular por una carretera en mal estado a velocidad moderada (70 km/h), produce un nivel de esfuerzos en la suspensión que es 164% mayor que el nivel que se registra para el mismo vehículo circulando por una carretera en buen estado. Como se muestra en la Figura 5.7, la sobrecarga del vehículo, magnifica el efecto de circular por una carretera en malas condiciones. Con

un 20% de sobrecarga, se registraron niveles de esfuerzo en la suspensión, 13% mayores que los registrados a su carga nominal, circulando por una carretera mala. En una carretera en buen estado, el aumento en el nivel de esfuerzos producido por esta sobrecarga fue de sólo el 7%.

La variación del nivel de esfuerzos en la suspensión se amplifica con la velocidad, teniéndose que para las mediciones en campo llevadas a cabo, se observó que el nivel de esfuerzos en la suspensión registrado a 100 km/h, fue 183% mayor que el registrado a 50 km/h al circular en una carretera mala. En una carretera en buen estado, el aumento fue del 109%.

5.3 Impacto global de la interacción vehículo pesado - pavimento en el deterioro de la red carretera mexicana

Con base en la información disponible a la fecha para el caso mexicano, es posible establecer que se puede lograr una reducción en la velocidad de deterioro de las carreteras, si se toman acciones normativas que fomenten el concepto de *amigabilidad* en las condiciones de operación de los vehículos y en el desempeño de los componentes de sus suspensiones.

Para fines de evaluación del potencial de ahorro, supongamos que la velocidad de deterioro de la red carretera tiene una determinada tendencia. Tomando esta tendencia como referencia, es posible estimar el cambio que sufriría la velocidad de deterioro de la red, si circularan los vehículos sin sobrecarga o sobrevelocidad y equipados con suspensiones *amigables*. Para fines de esta estimación, en todos los casos se consideró que la velocidad del deterioro de las carreteras depende en 50% de la deformación del pavimento y que el otro 50% depende del nivel de impacto dinámico. Todos los factores ambientales y de uso, permanecen sin cambio con o sin suspensiones amigables.

De la información presentada anteriormente, se desprende que en México alrededor del 20% de los vehículos de carga viajan con un promedio de 20% de sobrecarga. Asimismo, de las mediciones efectuadas para el caso de un 20% de sobrecarga, se obtuvo un 43% más de deformación del pavimento. De esta manera, evitando la sobrecarga, se lograría reducir la velocidad de deterioro de la red carretera. Como ejemplo para estimar el potencial de reducción del daño a la red carretera por sobrecarga de los vehículos, tomemos los datos para el 20% de sobrecarga promedio detectado en México. Esto es, si el 30% de la flota vehicular deforma 43% menos el pavimento y esta deformación contribuye en un 50% al deterioro total de la

red carretera, se tendría una disminución global del 6% en la velocidad de deterioro de las carreteras.

El nivel de impacto dinámico de los vehículos pesados sobre el pavimento se ve afectado por el tipo de suspensión y la velocidad de operación. Si se fomenta el empleo de suspensiones *amigables*, se podría obtener una reducción en los niveles de este impacto. De los datos reportados, se estima que el empleo de suspensiones *amigables* con los niveles de amortiguamiento adecuados, permitiría obtener en promedio, una reducción de alrededor del 20% en el nivel de impacto dinámico de los vehículos sobre el pavimento. Si en México, el uso de suspensiones *amigables* se extendiera al 40% de la flota vehicular de carga, se podría obtener una reducción en la velocidad de deterioro de la red carretera de 4%.

Con base en la información presentada se puede establecer que el nivel de impacto dinámico aumenta con la velocidad y la rugosidad de la carretera. Para fines de estimación de la influencia de la sobrevelocidad en el nivel de impacto dinámico, consideremos que para una sobrevelocidad del 20% con el vehículo de prueba circulando en una carretera en regulares condiciones, se registró un aumento en la carga dinámica de 15%. De esta manera, si se supone que el 60% de los vehículos circulan con una sobrevelocidad promedio del 20%, se tendría un potencial de reducción en la velocidad de deterioro de las carreteras, por efecto de la sobrevelocidad en el nivel de impacto dinámico, de 4.5%.

5.4 Conclusiones

Considerando todo lo anterior, se tiene que el efecto global del impacto dinámico sobre la velocidad de deterioro de la red carretera, sería de 4% por efecto del tipo de suspensión y 4.5% por efecto de la velocidad. Estos valores, aunados al 6% de reducción de la velocidad de deterioro por efecto de la sobrecarga, permite estimar conservadoramente, un potencial de reducción de la velocidad de deterioro de la red carretera en México de alrededor del 15%.

Se estima que el seguir políticas que tiendan a reducir la sobrecarga, el exceso de velocidad y el fomentar el uso de suspensiones *amigables*, podría reducir la velocidad de deterioro de las carreteras y por ende el costo de su conservación. Esto suena muy bien en teoría, pero hay que llevar a la práctica estas políticas, para empezar a ver resultados en los próximos años.

5.5 Referencias

1. Arriaga M. y López O.A., 1996. Las carreteras en México en el siglo XX, Instituto Mexicano del Transporte, Nota 109.
2. Arredondo R., 1996. "Criterio para jerarquizar la conservación de carreteras con base en su importancia económica". Publicación Técnica No. 83, Instituto Mexicano del Transporte.
3. Castillo Sánchez M. y Mendoza Díaz A., 1996. "Algunos datos estadísticos de los vehículos del autotransporte de carga que circulan por las carreteras nacionales". Instituto Mexicano del Transporte, Nota 115.
4. IMT. SCT. 1993. *Manual Estadístico del Sector Transporte*. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro.
5. Arredondo R., y op. cit.
6. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Simulación de estrategias de mantenimiento y vial. Programa Sister*, 1996. Dirección General de Conservación de Carreteras,
7. Castillo S.M.; Mendoza, A. y Gutiérrez J.L., "Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos de carga que circulan sobre las carreteras nacionales. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 1992 y 1993". Documento Técnico No. 17. Instituto Mexicano del Transporte, 1995.
8. Castillo S.M. y Mendoza D.A., op. cit.
9. Rico A.; Mendoza A., y Elías S., 1997. "Impacto económico de los movimientos en vacío en el autotransporte nacional de carga" Instituto Mexicano del Transporte, Nota No. 122.
10. Castillo S.M. y Mendoza, A., op. cit.
11. J. Chavarría; A. Mendoza y E. Mayoral., 1997. Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en las carreteras nacionales. Publicación Técnica No. 89 Instituto Mexicano del Transporte.

12. Lozano A.; Romero J.A. y Jáuregui J.C., 1996. "Heavy vehicles suspension dynamic response and its relation with potential damage to roads". IV Vehicle-Infrastructure, Conference, Engineering Foundation, San Diego, Cal.
13. Wang T.L.; Sahaawy M., y Huang D.Z. 1993. "Vehicle Dynamic Response" Computers and Structures., Pergamon Press, Vol. 49, No. 6, pp 1055-1067.
14. Lozano A.; Carrión F.J.; Vázquez D., y Escamilla L.. 1995 "Heavy duty vehicles road interaction, experimental assessment.", 7th World Conference on Transport Research, WCTR, Sydney, Australia.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 688 76 29
688 76 03
Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues-Galindo
76700 P. Escobedo, Qro.
Tels. (42) 16 97 77
16 96 46
16 95 97
Fax (42) 16 96 71
Internet <http://www.imt.mx>