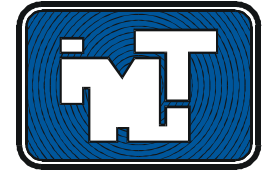




ISSN 0188-7297



ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL DAÑO A PAVIMENTOS CAUSADO POR VEHÍCULOS PESADOS

José Antonio Romero Navarrete
Subash Rakheja
Alejandro Lozano Guzmán
Waiz Ahmed
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No. 190
Sanfandila, Qro, 2002

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

**Estudio de la distribución
espacial del daño a pavimentos
causado por vehículos pesados**

**Publicación Técnica No. 190
Sanfandila, Qro, 2002**

El presente documento fue elaborado por José Antonio Romero Navarrete, Subhash Rakheja, Alejandro Lozano Guzmán y Waiz Ahmed, como resultado de un trabajo internacional de colaboración entre la Coordinación de Equipamiento para el Transporte del IMT y el Centro de Investigación en Ingeniería Vehicular (CONCAVE) de la Universidad de Concordia, Montreal, Canadá. Este trabajo fue revisado por el Dr. Miguel Martínez Madrid.

| | |
|---|-----------|
| Resumen | VII |
| Abstract | IX |
| Resumen ejecutivo | XI |
| Definiciones | XIII |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 Revisión de la literatura | 3 |
| 1.2 Objetivo y alcance | 5 |
| 2 Metodologías para el estudio de la distribución espacial del deterioro de pavimentos | 7 |
| 2.1 Descripción de la muestra de flujo vehicular | 7 |
| 2.2 Repetibilidad espacial de los “perfiles” de fuerza | 8 |
| 2.3 Agregación de fuerzas | 17 |
| 2.4 Agregación de fuerzas y Ley de la Cuarta Potencia | 18 |
| 2.5 Energía de deformación del pavimento | 20 |
| 2.6 Análisis espectral en longitudes de onda | 21 |
| 2.7 Consideraciones finales | 22 |
| 3 Efecto espacial de las propiedades de los vehículos | 23 |
| 3.1 Propiedades del tráfico | 23 |
| 3.2 Elementos de análisis | 25 |
| 3.3 Resultados y discusión | 26 |
| 4 Conclusiones | 35 |
| Referencias | 39 |
| Apéndice: Modelo de la energía de deformación | 41 |
| A.1 Modelado de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento | 41 |
| A.2 Modelo de pavimento | 44 |
| A.3 Análisis de la energía almacenada en el pavimento | 45 |
| A.4 Validación del enfoque de la energía de deformación | 47 |
| A.5 Metodología de la solución | 48 |

Las irregularidades y ondulaciones inherentes a los pavimentos provocan que los vehículos vibren verticalmente mientras se desplazan por los caminos. Estas vibraciones de las masas de los vehículos inducen la variación de las fuerzas que estos vehículos ejercen sobre el pavimento. Las vibraciones de las masas de los vehículos son función de las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento de sus componentes, así como de la velocidad de operación y del nivel de irregularidades en los pavimentos. Las variaciones de las fuerzas aplicadas sobre los pavimentos, producto de la vibración de los vehículos, implica el que haya segmentos de pavimento donde las fuerzas de los vehículos sean mayores, provocando con ello una concentración del daño de los pavimentos.

En este trabajo se analizan diferentes metodologías para el análisis de la distribución espacial del efecto dañino de los vehículos sobre los pavimentos, incluyendo caracterizaciones por cuanto a la repetibilidad de las fuerzas de los vehículos a lo largo del perfil del pavimento y el análisis de tales fuerzas con relación a las longitudes de onda dominantes y su dispersión espacial. Se propone una metodología consistente en la determinación de la energía de deformación que transitoriamente se almacena en el pavimento durante el paso de los vehículos, en el contexto de un esquema computacional que incluye modelos de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento y un modelo discreto de pavimento.

Los resultados de las distintas metodologías, al aplicarlas al análisis de los efectos potenciales sobre el pavimento de un tráfico real medido, señalan una desigual distribución espacial del daño a los pavimentos, con diferencias espaciales desde un 30 hasta un 138 %, como una función de la metodología considerada.

Inherent pavements unevenness causes the vertical vibration of vehicles while moving on the roads. Such vibrations of vehicles' masses originate that vehicle forces on pavements change along the pavement profile, and are a function of stiffness, masses and damping properties of vehicles and of traveling speed and pavement profile. As a result of these variations in vehicle forces, uneven pavement deterioration occurs.

In the present work an analysis is made of different methodologies and approaches aimed to characterize the pavement spatial deterioration, including vehicle forces spatial repeatability, wavelength content, and spatial dispersion. It is proposed a methodology for evaluating vehicles effect on pavements, which is based on the strain energy that is transiently stored within pavements during vehicles transit. Such methodology includes formulations for simulating vehicle dynamic response to pavement profile and a pavement discrete model.

Results from the different methodologies, when applied to a real traffic distribution, suggest an uneven pavement deterioration caused by heavy vehicles, with variations ranging from 30 to 138 % for the difference between the less and most damaged pavement segments.

Resumen ejecutivo

Los vehículos ejercen sobre los pavimentos fuerzas cuya magnitud varía debido a la vibración de las distintas masas que conforman a los vehículos. Despreciando cualquier otra perturbación interna en el vehículo (movimiento de la carga o vibraciones en el tren motriz), tales vibraciones de las masas de los vehículos se deben a la respuesta dinámica de los componentes de éstos a las perturbaciones provenientes de las irregularidades presentes en el pavimento. De esta manera, en el caso de un pavimento perfecto, sin ondulación alguna, las fuerzas sobre el pavimento permanecerían constantes si el vehículo es conducido en línea recta a velocidad constante, siendo la magnitud de tales fuerzas una función del peso propio del vehículo y de la forma en que fue cargado.

Las variaciones de las fuerzas ejercidas sobre el pavimento por los vehículos dan lugar a que se desarrollen “perfiles” de fuerza a lo largo del perfil del pavimento. Estos perfiles son una función de la forma en que vibra el vehículo, lo cual depende a su vez de las características de masa y rigidez del mismo y de las condiciones de perturbación del pavimento y de la velocidad de operación. A cada eje de cada vehículo que transita por un tramo de carretera corresponderá entonces un cierto perfil de fuerza. Al agregar los perfiles de fuerza asociados a los distintos ejes en un tránsito dado, es de esperarse que no exista una distribución uniforme de estas fuerzas agregadas a lo largo del pavimento, sino que haya secciones del mismo que sufran una concentración de las fuerzas y por lo tanto del daño. Esto es, la distribución espacial de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento no reproduce un patrón aleatorio, sino que tiene que ver con la respuesta específica de los vehículos al perfil del pavimento.

La preocupación por la desigual distribución del daño a los pavimentos por efecto del tráfico, ha estado presente en el contexto de las investigaciones sobre el deterioro de los pavimentos, habiéndose propuesto distintas metodologías para analizar esta distribución desigual del efecto de los vehículos sobre los pavimentos. Tal preocupación se derivó de reconocer que muchos vehículos en un tráfico real tienen propiedades semejantes por cuanto a rigidez y masas, por lo que al circular por un cierto perfil de pavimento, a la misma velocidad, podrían dar lugar a patrones similares de fuerza sobre el pavimento, provocando con ello una dañina concentración del deterioro en algunas porciones del pavimento.

En este trabajo se exponen distintas metodologías para el análisis de la distribución espacial del efecto de los vehículos sobre el pavimento, incluyendo un esquema computacional en el que la energía de deformación que se almacena transitoriamente en un pavimento asfáltico durante el paso de los vehículos, es tomada como una medida del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento. Otros enfoques incluyen el análisis de la correlación entre los distintos perfiles de fuerza asociados a los ejes de un tránsito medido, así como la

dispersión de las fuerzas de los vehículos sobre el perfil del pavimento bajo la consideración de las fuerzas elevadas a la primera y a la cuarta potencias (Ley de la Cuarta Potencia del deterioro de pavimentos asfálticos). Considerando un flujo real medido de vehículos pesados, en este trabajo también se incluye un análisis del efecto que las variaciones en las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los componentes de los vehículos (suspensiones y llantas), pudiera tener sobre la distribución espacial del deterioro de los pavimentos. En este contexto, se destaca la importancia de considerar flujos vehiculares reales para el análisis objetivo de la interacción vehículo pesado – pavimento.

Los resultados de las distintas metodologías empleadas en este trabajo señalan que para un flujo vehicular medido, la repetibilidad de los perfiles de fuerza sobre el pavimento es pequeña, obteniéndose coeficientes de correlación mayores de 0.6 sólo en el 2.4% del volumen vehicular total considerado (856 unidades en este caso). Por cuanto a la falta de uniformidad en el daño potencial causado por los vehículos a lo largo del pavimento, se obtuvo que dicha des-uniformidad depende de la metodología de evaluación empleada. De esta manera, la distribución espacial agregada de las fuerzas sobre el pavimento arrojó que la diferencia entre el mayor y menor daño potencial a lo largo del pavimento puede ser del 30%, mientras que para el enfoque de la Ley de la Cuarta Potencia fue del 138 %. En el caso del modelo de la energía de deformación, este porcentaje se situó en 53. Estos porcentajes indican irremediamente que hay un importante efecto espacial de los vehículos sobre el deterioro de los pavimentos, reflejándose en la falla prematura de algunas secciones de éstos. La metodología aplicada por cuanto al análisis espectral de las distribuciones de energía a lo largo del pavimento, reveló la presencia de longitudes de onda dominantes entre 2.5 y 13.9 metros, asociadas éstas a la respuesta dinámica de las distintas masas de los vehículos al perfil del pavimento. Por cuanto al efecto que sobre la distribución espacial del deterioro potencial causado a los pavimentos tienen las variaciones en las propiedades de los componentes de los vehículos, se obtuvo que cambios en los niveles de amortiguamiento de la suspensión y rigidez de las llantas, producen variaciones en el contenido espectral de las diferentes longitudes de onda dominantes, en un rango de entre el 20 y el 50 por ciento. El análisis de la dispersión de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento, con respecto a su valor promedio, evidenció que las características de las llantas y suspensiones podrían afectar de manera desigual el deterioro de los pavimentos, como una función precisamente del estado del pavimento.

El efecto espacial de un tráfico mixto sobre los pavimentos, producto de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, explica parcialmente las necesidades diferenciadas de mantenimiento y reparación a lo largo de los caminos. Otro elemento a considerar en investigaciones futuras es el efecto espacial de la variación de las propiedades físicas de resistencia de los pavimentos a lo largo de sus perfiles.

Para facilitar la comprensión de este texto, a continuación se definen en orden alfabético algunos términos empleados de manera reiterada, incluyendo entre paréntesis sus correspondencias lexicológicas en Inglés.

Densidad espectral de potencia en longitud de onda (*Wavelength power spectral density*) – Es el análisis del contenido de longitudes de onda en la distribución de una variable en el espacio, derivado de un análisis de Fourier. Al elevarse al cuadrado las amplitudes de las distintas longitudes de onda resultantes, presentes en la señal analizada, se establece la noción de potencia. Por otro lado, la división de estas magnitudes entre el inverso de la longitud de onda, provee el sentido de densidad.

Índice Internacional de Rugosidad (*International Roughness Index*) – Medida de la falta de uniformidad del pavimento, obtenida mediante la simulación del paso de un vehículo en particular sobre el pavimento evaluado. La vibración relativa de las dos masas que componen a este vehículo, en términos de la distancia recorrida por el mismo, determina el valor de este índice. Se mide por lo general en mm de desplazamiento relativo de las masas entre metros de distancia recorrida (mm/m).

Ley de la cuarta potencia (*4th power law*) – Relación empírica entre la magnitud de la carga estática aplicada por los vehículos y el deterioro que causan al pavimento, la cual señala que el incremento en el deterioro causado al pavimento al variar en cierta proporción la carga estática aplicada, está relacionado con la cuarta potencia de tal proporción. De acuerdo con esto, el duplicar una carga estática del vehículo provocaría un deterioro 16 veces mayor (2^4).

Masa no suspendida (*unsprung mass*) – Es la integración de las masas de los ejes, llantas y suspensiones como una sola, la cual no está siendo cargada por la suspensión del vehículo.

Masa suspendida (*sprung mass*) – Es la masa del vehículo considerada que descansa sobre las muelles.

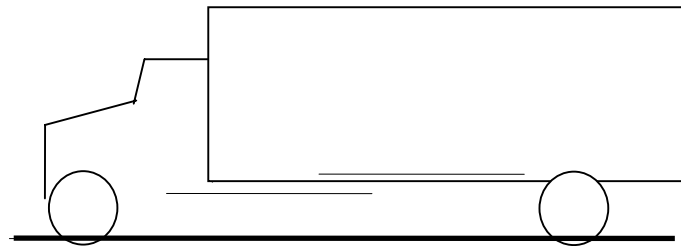
Rugosidad del pavimento (*Pavement roughness*) – Son las variaciones en el perfil del pavimento que provocan vibraciones en el vehículo dentro de un cierto rango de frecuencias (1 a 20 Hz). Las variaciones en el perfil del camino, asociadas a estas frecuencias, implican irregularidades del camino entre 20 cm y 60 m de longitud. Se mide a través del Índice Internacional de Rugosidad.

1 Introducción

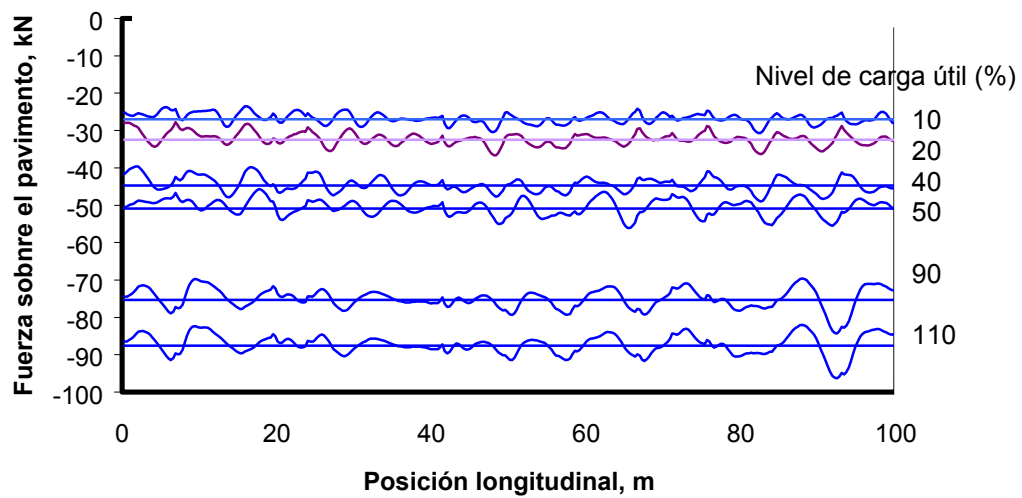
Las fuerzas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos son la suma de magnitudes estáticas y dinámicas. La parte estática de estas fuerzas no cambia durante el trayecto de los vehículos, y es función de los pesos propios de sus distintos componentes y de la magnitud y distribución, sobre los mismos vehículos, de la carga útil que transportan. Por otro lado, la componente variable o dinámica de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, es función de la respuesta dinámica del vehículo a las irregularidades presentes en esta infraestructura. Esta respuesta está caracterizada por la vibración de los distintos componentes del vehículo y es una función de las propiedades tanto del vehículo como del pavimento. Por cuanto a las propiedades de los vehículos, se tienen, por ejemplo, la rigidez de las llantas y suspensiones, el nivel de carga útil, las dimensiones entre ejes y la velocidad de tránsito. Por el lado del pavimento, la propiedad más importante que afecta la respuesta de los vehículos, consiste en la variación longitudinal de las alturas del pavimento, o perfil.

Para ejemplificar lo anterior se ha considerado la respuesta de un cierto vehículo a un perfil dado de pavimento. La Figura 1(a) muestra el vehículo pesado considerado, el cual se caracteriza por no ser articulado y tener dos ejes. La Figura 1(b) muestra los resultados de simulaciones por cuanto a las fuerzas que el eje delantero de este vehículo ejerce sobre el pavimento, para distintos niveles de carga. La Figura 1(c) ilustra el perfil de pavimento por donde se hace circular al vehículo. En los resultados de la parte (b) de esta figura se puede observar que las fuerzas dinámicas sobre el pavimento oscilan alrededor de los valores estáticos de tales fuerzas. Se puede observar en estos resultados la influencia que sobre las magnitudes de las fuerzas de este eje sobre el pavimento, tienen tanto el perfil del pavimento como el nivel de carga. De esta manera, la respuesta dinámica del vehículo al perfil del pavimento se ve reflejada en estos resultados.

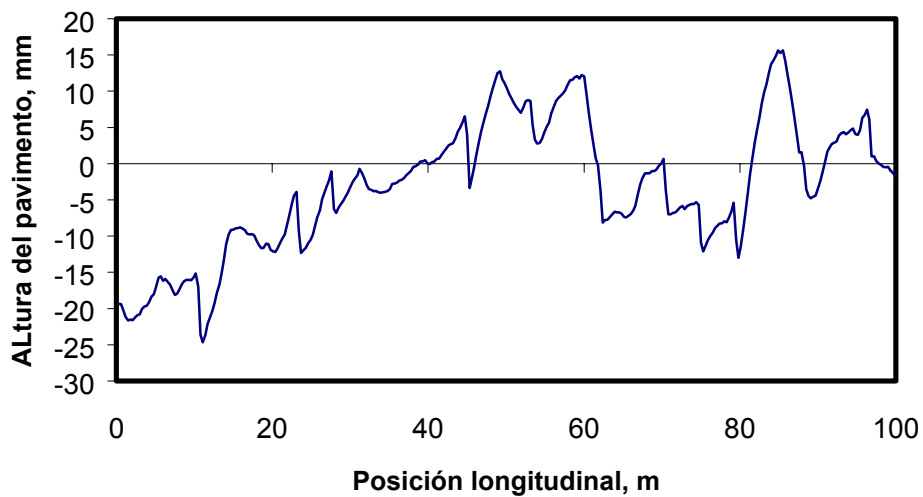
Con relación a los “perfiles de fuerza” mostrados en la Figura 1(b), de manera intuitiva es factible esperar que haya secciones de pavimento que sufran valores más elevados de estas fuerzas, y por lo tanto un mayor deterioro. Esta aparente concentración de las fuerzas máximas ejercidas sobre el pavimento por el eje considerado, es el resultado de las características dinámicas del vehículo y del perfil del pavimento. La Figura (2) ilustra el perfil resultante de los seis perfiles de fuerza ilustrados en la Figura 1(b), en donde se observa claramente que habrá partes del pavimento (alrededor de los 92 m), las cuales sufrirán mayores cargas totales y, por lo tanto, mayor deterioro.



(a)



(b)



(c)

Figura 1: (a) Vehículo tipo C2; (b) Fuerzas al pavimento del eje delantero del vehículo C2; (c) Perfil del pavimento considerado.

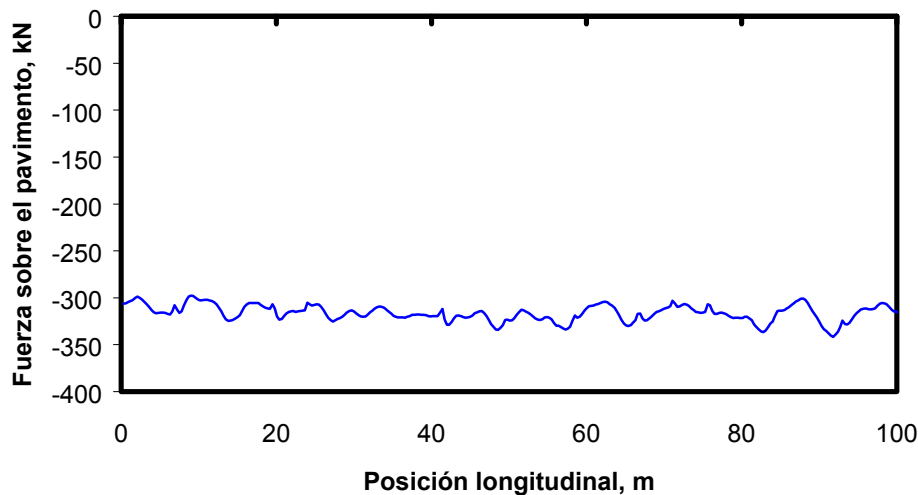


Figura 2: Fuerzas acumuladas para los seis ejes mostrados en la Figura 1(b).

1.1 Revisión de la literatura

La concentración espacial descrita por cuanto a los valores de las fuerzas dinámicas que los vehículos ejercen sobre el pavimento, ha sido reconocida como una importante causa para la falla prematura de los pavimentos (Cebon, 1993; Kenis et al., 1998). De esta manera, los patrones espaciales de la distribución del deterioro de los pavimentos ha sido el tema de diversos estudios teóricos y experimentales, que han tenido como objeto el mejorar el conocimiento acerca de la repetibilidad espacial de las fuerzas que los vehículos ejercen a lo largo del camino, y su relación con el deterioro prematuro de los pavimentos (OECD, 1998).

En este contexto, en el que una gran cantidad de elementos afecta la interacción vehículo-pavimento, se ha reconocido que para un análisis realista de la distribución espacial del deterioro de los pavimentos, es importante considerar flujos vehiculares representativos de los variados tránsitos existentes. Tales flujos vehiculares están compuestos, en general, por diferentes configuraciones de vehículos, pudiendo tener cada uno de éstos una particular condición de diseño y operación (Moran, et al., 1995). De acuerdo con esto, como elemento 5 del proyecto OECD-DIVINE (*Dynamic interaction of heavy vehicles with roads and bridges*), se llevó a cabo un análisis de la repetibilidad espacial de las cargas aplicadas por los vehículos sobre el pavimento y de los daños consecuentes en estas infraestructuras (OECD, 1998). Esto se realizó a través de mediciones de las fuerzas en los ejes de los vehículos, considerando un flujo de tráfico compuesto de

distintas configuraciones vehiculares (“mixto”), al circular por dos diferentes segmentos de camino. Después de analizar el promedio de estas fuerzas sobre el pavimento, se concluyó que las componentes dinámicas de estas fuerzas tienden a concentrarse en puntos determinados a lo largo de los caminos que fueron seleccionados. Estos puntos de concentración de fuerzas se encontraron separados entre sí una distancia de 8 a 10 metros. El estudio también reportó que para un pavimento de baja rugosidad, las variaciones en la suma agregada de las fuerzas de los ejes de los vehículos en un punto dado de concentración de fuerzas, fue mayor, en un diez por ciento, respecto al valor promedio de tales agregaciones de fuerzas. Para el caso de un camino de alta rugosidad, este efecto se elevó por lo menos al doble. Adicionalmente, al estudiar el potencial efecto que sobre los patrones de distribución de las fuerzas sobre el pavimento pudiera tener el tipo de suspensión usado en los camiones, se encontró en ese estudio que la concentración de las fuerzas dinámicas para el caso de vehículos equipados con suspensiones de aire, fue tan sólo la mitad de aquella asociada al tránsito de vehículos equipados con muelles de acero. Por otra parte, de los resultados preliminares del proyecto DIVINE, Jacob (1995) reportó que el peso “dinámico local”, obtenido de sumar en un sólo punto las fuerzas de todas los ejes en una situación de tráfico mixto, exhibió crecimientos de entre el diez y el quince por ciento al aumentar la velocidad del tránsito. El estudio espectral de las longitudes de onda de estas fuerzas de las llantas, reportó valores pico en las vecindades de 9 m, 3.28 m, 1.64 m, 1.08 m, 0.8 m, 0.64 m, 0.54 m, 0.46 m, 0.4 m y 0.32 m. Acerca de estos resultados, se señala que el pico detectado a una longitud de onda de 3.28 m podría estar relacionado con la circunferencia de la rueda, y que el pico de 1.64 m estaría asociado a su valor armónico. Asimismo, que las longitudes de onda menores de un metro estarían asociadas a la macrotextura del pavimento.

Por su parte, LeBlanc y Woodrooffe (1995) llevaron a cabo mediciones de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, usando para ello diferentes combinaciones vehiculares de 6-ejes. Calcularon los coeficientes de correlación entre las fuerzas dinámicas medidas en cada eje, obteniéndolas como una función del tipo de suspensión, de la velocidad de tránsito y de la rugosidad del pavimento. Las cargas debidas a los ejes equipados con suspensiones de aire revelaron un mayor coeficiente de correlación espacial, con respecto a los ejes equipados con muelles de acero. De esta forma, para caminos de rugosidad media fueron obtenidos coeficientes de correlación espacial hasta de 0.65 en el caso de suspensiones de aire, y de 0.3 para el caso de suspensiones tipo viga oscilante (*walking beam*).

Empleando técnicas de pesaje en movimiento, Gyenes y Mitchell (1994) investigaron la repetibilidad espacial de las fuerzas dinámicas de los ejes sobre el pavimento, encontrando que las fuerzas agregadas a lo largo del pavimento exhibieron longitudes de onda alrededor de los ocho metros. Reportan asimismo que las cargas dinámicas medidas en caminos de rugosidad media, exhibieron aumentos de aproximadamente nueve por ciento sobre las cargas estáticas, mientras que esta cifra creció al quince por ciento en el caso de caminos en mal

estado (alta rugosidad). Adicionalmente, dicho estudio reporta que con base a la Ley de la Cuarta Potencia, estas diferencias en las fuerzas agregadas, traducidas en deterioro del pavimento, representarían diferencias espaciales de deterioro del pavimento en un orden del 41 y 75 por ciento, respectivamente para un pavimento medianamente rugoso y otro altamente rugoso.

Cole et al. (1996) reportó las fuerzas dinámicas de los ejes sobre el pavimento, tanto de un flujo vehicular controlado como de un flujo real de una supercarretera, aplicándoles la Ley de la Cuarta Potencia y obteniendo los resultados agregados a lo largo del perfil del pavimento. Para estos resultados agregados, se estableció una longitud de onda dominante alrededor de los 8 metros, lo cual se atribuyó a las frecuencias resonantes de las masas suspendidas de los vehículos. Por otro lado, los datos correspondientes a una muestra de 542 vehículos en un tráfico real, no revelaron la presencia de ninguna longitud de onda dominante. Con base a la Ley de la Cuarta Potencia, el estudio concluye que el daño máximo debido a las cargas dinámicas, es dos veces aquél causado al considerar sólo las cargas estáticas.

Otros estudios han redundado en la dependencia que de las cargas útiles de los vehículos y de las configuraciones y propiedades de las suspensiones de éstos, tiene la distribución espacial de las fuerzas de los vehículos pesados sobre el pavimento (Kenis et al., 1998). De esta manera, se ha concluido que, al estar los vehículos equipados con distintos tipos de suspensiones, las distribuciones espaciales de sus fuerzas dinámicas sobre los pavimentos pueden resultar considerablemente diferentes entre sí (Wong, 1993).

Por cuanto al efecto de las propiedades de los componentes de los vehículos sobre la distribución espacial de las fuerzas sobre el pavimento, ha sido reportado que las presiones de inflado de las llantas tiene tan sólo un pequeño efecto sobre los valores de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, sobretodo al comparar estos efectos con los de otros factores tales como la velocidad de tráfico y rugosidad del camino (Kulakowski et al., 1995). Sin embargo, el efecto global de la presión de inflado (rigidez de la llanta), en el contexto de situaciones reales de tráfico, requería ser estudiado.

1.2 Objetivo y alcance

Es el objetivo de este trabajo ilustrar diferentes metodologías para estudiar la distribución espacial del efecto potencial de los vehículos sobre los pavimentos, aplicándolas a un flujo medido de vehículos pesados. Aunado a esto, se tiene como finalidad el estudiar el efecto que las variaciones en algunos parámetros de operación de los vehículos, tienen sobre la distribución espacial del deterioro potencial del pavimento.

En la sección 2 se muestran distintas metodologías y aproximaciones al estudio de la distribución espacial del deterioro de los pavimentos, que incluyen los coeficientes de correlación entre “perfiles de fuerza” de los ejes y distintas medidas de la dispersión de las fuerzas sobre el pavimento. En el análisis de la dispersión se emplea también un modelo de la energía de deformación del pavimento, el cual se propone como medida del potencial efecto de los vehículos pesados sobre el pavimento. Este esquema de la energía de deformación del pavimento se describe en detalle en el Apéndice de esta publicación.

2 Metodologías para el estudio de la distribución espacial del deterioro de pavimentos

La distribución espacial del deterioro potencial de los pavimentos causado por el paso de vehículos pesados ha sido enfocada desde distintas perspectivas, como se describe a continuación:

- Correlación de los perfiles de fuerza. Tomando como referencia el “perfil de fuerza” de un eje y vehículo determinados, se calculan los coeficientes de correlación (r) de ese perfil con respecto a otros perfiles de fuerza, asociados a cada uno de los otros ejes en el tránsito.
- Fuerzas de los vehículos. Este enfoque consiste en la agregación de las fuerzas a lo largo del pavimento, derivadas de todos los ejes existentes en el tránsito.
- Cuarta potencia de las fuerzas de los vehículos. En este caso, las fuerzas que los vehículos ejercen sobre el pavimento son elevadas a la cuarta potencia y el resultado es agregado a lo largo del perfil del pavimento, de acuerdo a los distintos ejes de los vehículos en el tránsito.
- Energía de deformación. Se establece la agregación de la energía que de forma transitoria se almacena en el pavimento durante el paso de los vehículos, asumiendo un modelo discreto de pavimento.
- Densidad espectral de potencia. En este esquema se efectúan los análisis del contenido espectral (en longitudes de onda), de las distribuciones espaciales correspondientes a alguna variable seleccionada (ya sea la fuerza o energía de deformación).

En las siguientes secciones se muestra la aplicación de cada uno de los cinco enfoques descritos, atendiendo un flujo vehicular medido. Las fuerzas de los vehículos sobre los pavimentos se calculan empleando modelos desarrollados previamente (Romero, 1996).

2.1 Descripción de la muestra de flujo vehicular

Como producto de distintos estudios de Pesos y Dimensiones realizados por el Instituto Mexicano del Transporte, se cuenta con información de distintos tráficos en carreteras nacionales, caracterizados por el tipo de vehículos, sus pesos vehiculares y por la separación de sus ejes (IMT, 1996). La muestra de flujo

vehicular considerada en esta sección está compuesta de las siguientes cantidades y tipos de vehículos:

| <i>Cantidad</i> | <i>Tipo</i> |
|-----------------|-------------|
| 300 | C2 |
| 198 | C3 |
| 244 | T3S2 (S2) |
| 114 | T3S3 (S3) |

La Figura 3 ilustra estos distintos tipos de vehículos, cuya designación (C2, C3, T3S2 y T3S3), corresponde a la notación oficial en México (SCT, 1997). Sin embargo, con fines de simplificación, en algunos casos en este trabajo los vehículos T3S2 se designan simplemente como S2 y los T3S3 como S3.

Los perfiles de pavimento considerados fueron tomados de la literatura (UMTRI, 1996) y corresponden a pavimentos con baja, media y alta rugosidad, con índices de rugosidad de 0.9, 2.5 y 3.4 mm/m, respectivamente. Estos perfiles de pavimento fueron discretizados a intervalos de 0.3 m.

2.2 Repetibilidad espacial de los “perfiles” de fuerza

Un enfoque común para el estudio de la distribución espacial de las fuerzas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos y los potenciales deterioros de éstos, es el análisis de la correlación entre los diferentes “perfiles de fuerza” asociados a los distintos vehículos en el tránsito. Estos perfiles de fuerza representan las variaciones de las magnitudes de las fuerzas que los ejes de los vehículos aplican al pavimento a lo largo de su perfil. A continuación se ejemplifica este análisis para seis perfiles de fuerza, asociados al paso de vehículos tipo C2 a distintos niveles de carga útil. Posteriormente se presenta un análisis más general, atendiendo el flujo mixto descrito en 2.1.

Análisis de seis perfiles de fuerza

La Figura 4 ilustra la distribución espacial de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, asociadas al eje delantero de vehículos tipo C2, cargados a los distintos niveles de carga útil indicados. Tomando como referencia, de entre estas distribuciones de fuerza, la correspondiente a un 50 % de carga útil, la Tabla 1 lista los coeficientes de correlación r entre esta referencia y las otras distribuciones de fuerza. Estos valores, en general, son altos, aunque podrían variar en caso de tomar algún otro perfil de fuerza de referencia.

Valores altos para los coeficientes de correlación entre los distintos perfiles de fuerza asociados a los distintos ejes en el tránsito, implica que habrá secciones a lo largo del perfil del pavimento, las cuales sufrirán con mayor intensidad las fuerzas acumuladas ejercidas por los vehículos, con las debidas consecuencias por cuanto al deterioro prematuro de los caminos.

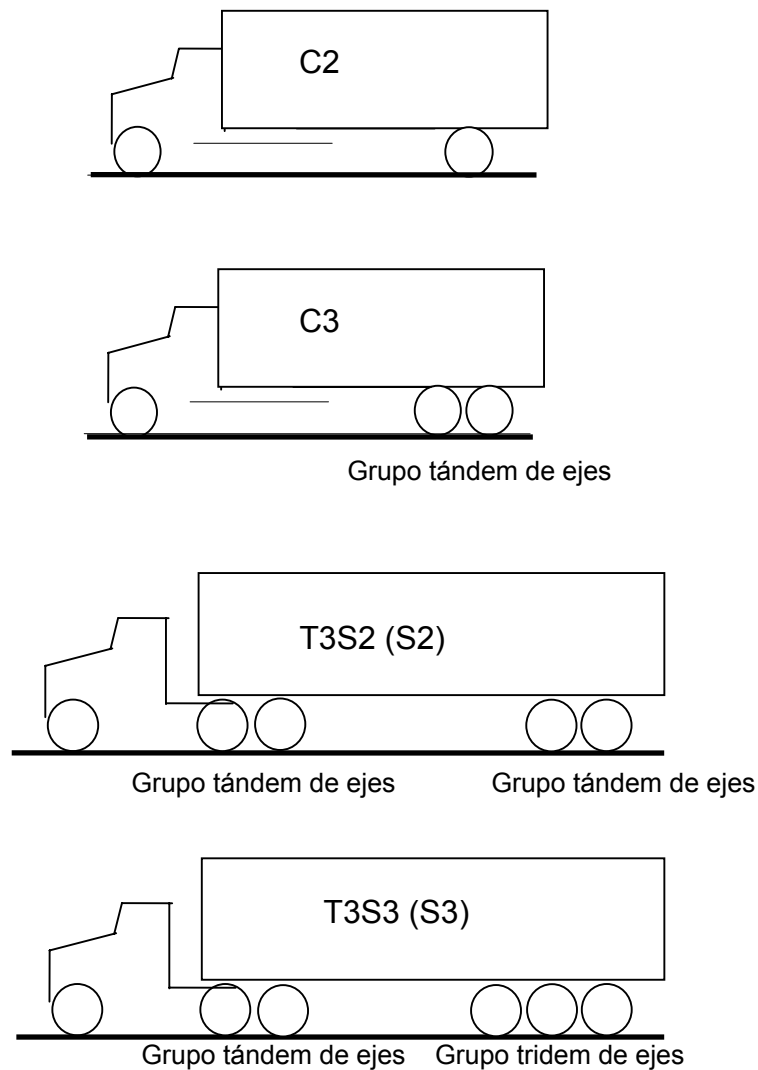


Figura 3: Representación esquemática y denominación de los vehículos presentes en el tráfico considerado.

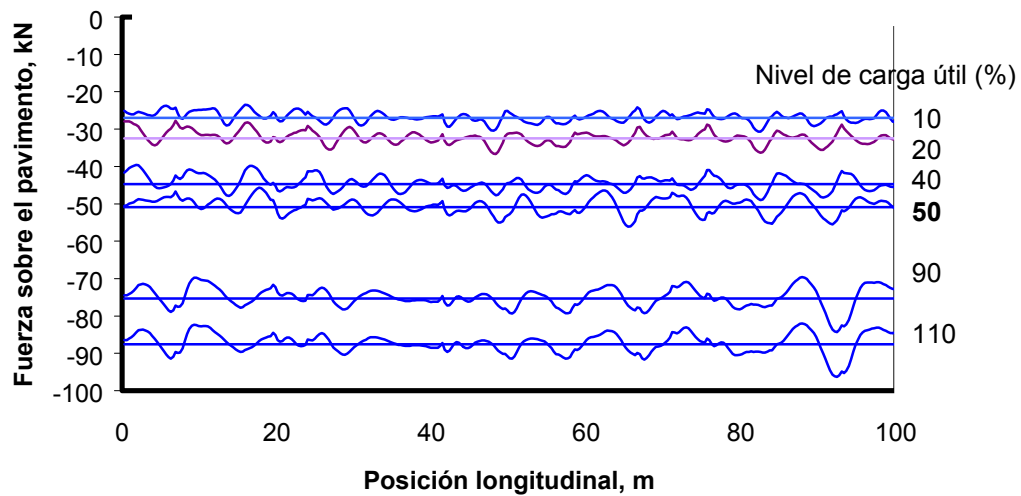


Figura 4: Fuerzas aplicadas al pavimento por el eje delantero del vehículo C2.

Tabla 1: Coeficientes de correlación para las curvas de la Figura 4.

| Nivel de carga % | Coefficiente de Correlación |
|---------------------|-----------------------------|
| 100 | 0.75 |
| 40 | 0.72 |
| 20 | 0.65 |
| 10 | 0.61 |
| 90 | 0.74 |

El análisis de los coeficientes de correlación tomando en cuenta flujos reales de vehículos constituye una aproximación necesaria para determinar, con mayor realismo, los niveles de repetibilidad de las distribuciones espaciales de las fuerzas que los vehículos ejercen sobre el pavimento. De esta manera, el análisis deberá considerar las distribuciones espaciales de las fuerzas que cada uno de los ejes en el tráfico ejerce sobre el pavimento, estableciendo una distribución de referencia y calculando los coeficientes de correlación del resto de las distribuciones de fuerzas, con respecto a esa distribución de referencia.

Análisis de correlación para el flujo medido de vehículos

Para el flujo mixto medido descrito en la parte 2.1, en esta sección se efectúan los distintos análisis de correlación, definiendo para ello algunas características adicionales por cuanto a la velocidad del tráfico y los perfiles de pavimento. La velocidad de los vehículos se ha establecido a partir de mediciones efectuadas en México (Chavaría et al., 1996). De esta manera, una velocidad media ha sido considerada, a la cual se ha adicionado un componente aleatorio, acotado a una variación de ± 10 km/h. Las características de rugosidad de los pavimentos corresponden a perfiles reportados en la literatura (UMTRI, 1996).

Como una ilustración del nivel de dispersión encontrado en el tráfico medido por cuanto a los niveles de fuerza en los ejes, la Figura 5 muestra las magnitudes de las fuerzas estáticas para los ejes de los vehículos tipo C2. En estos resultados se puede observar que la relación entre el valor máximo y el mínimo es amplia, mayor de 5 a 1.

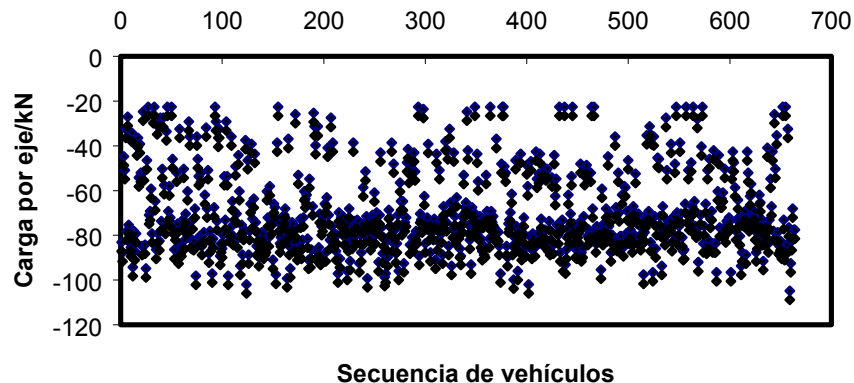


Figura 5: **Dispersión de las cargas estáticas por eje del vehículo C2.**

Los resultados de los coeficientes de correlación r se presentan para cada tipo de vehículo en el tránsito, mostrando los histogramas de los niveles para r . El perfil de fuerza tomado de referencia es el del eje trasero de un vehículo tipo C2, cargado al nivel promedio de carga útil encontrado en el tránsito para este eje.

Las Figuras 6 a la 9 ilustran los resultados para cada tipo de vehículo (C2, C3, T3S2, T3S3), respectivamente.

Los resultados de la Figura 6 muestran que el 24.3 por ciento de los ejes de los vehículos C2 exhibió un coeficiente de correlación mayor de 0.6. Se hace notar que este porcentaje relativamente alto se debe a que la referencia contra la cual se están correlacionando los distintos perfiles de fuerza, corresponde precisamente a uno de los ejes de este tipo de vehículos.

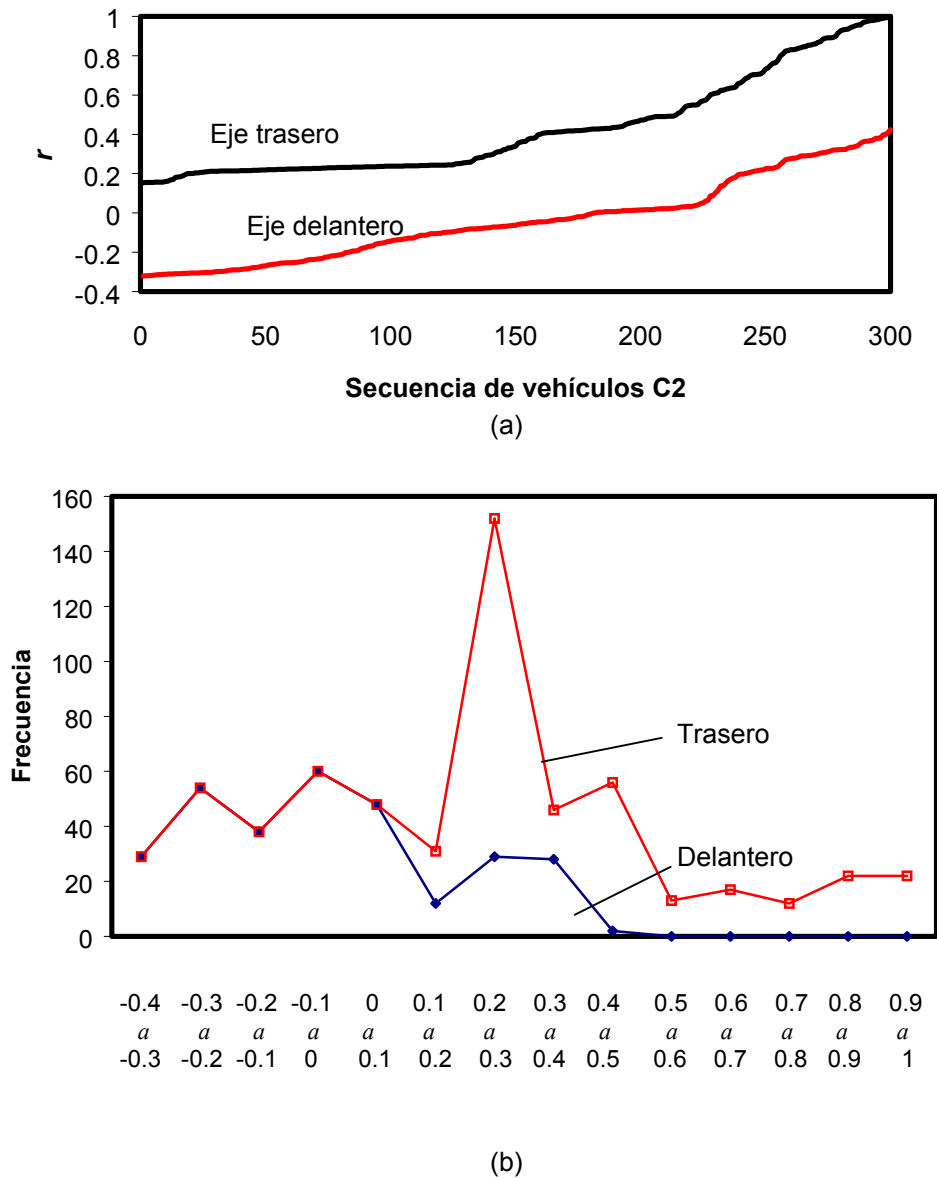
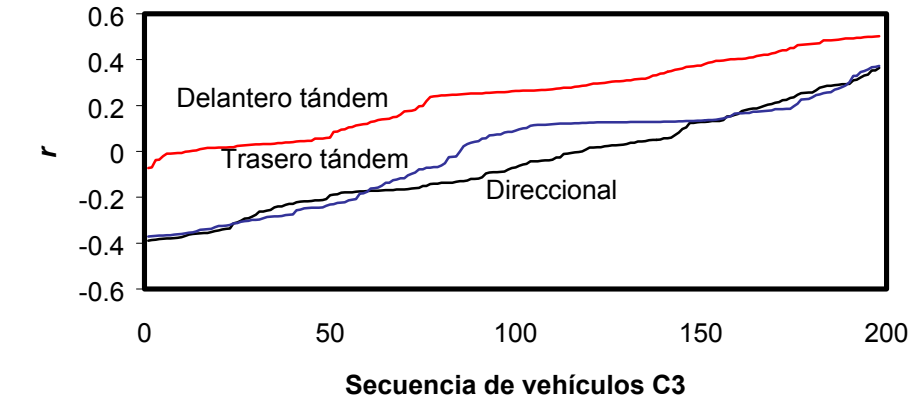
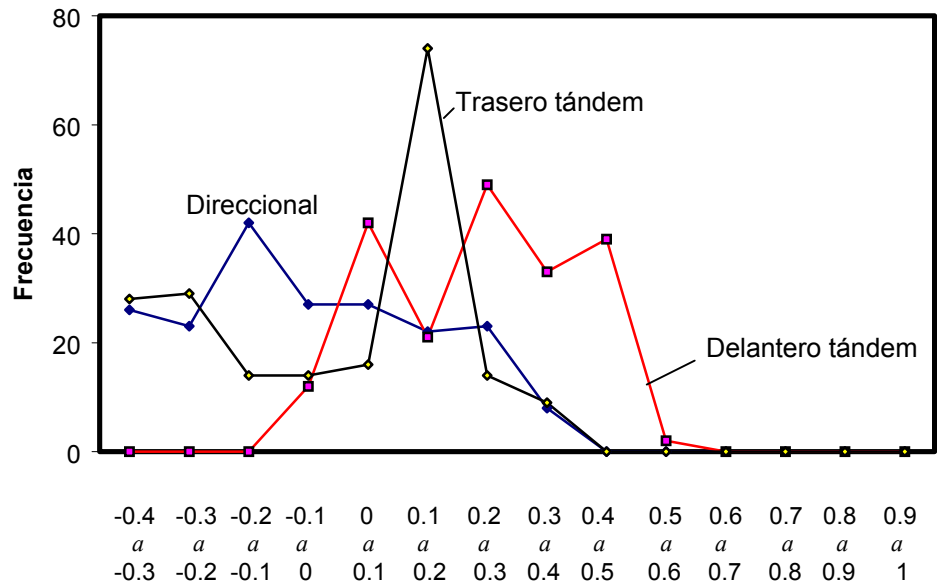


Figura 6: Variaciones de los coeficientes de correlación para los ejes de los vehículos tipo C2. (a) Distribución; (b) Histograma de frecuencias.

Los resultados de la Figura 7 muestran que ninguno de los ejes de los vehículos C3 en el tránsito presentó una correlación mayor de 0.6, obteniéndose los valores más altos para los ejes delanteros del tándem de estos vehículos.



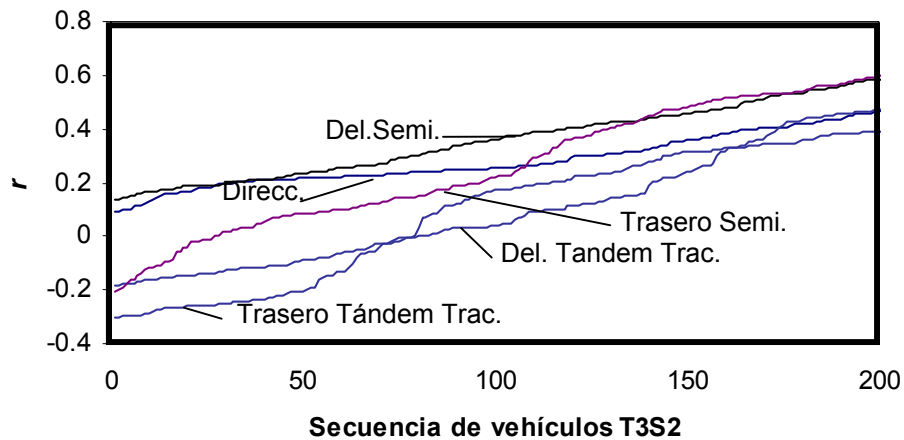
(a)



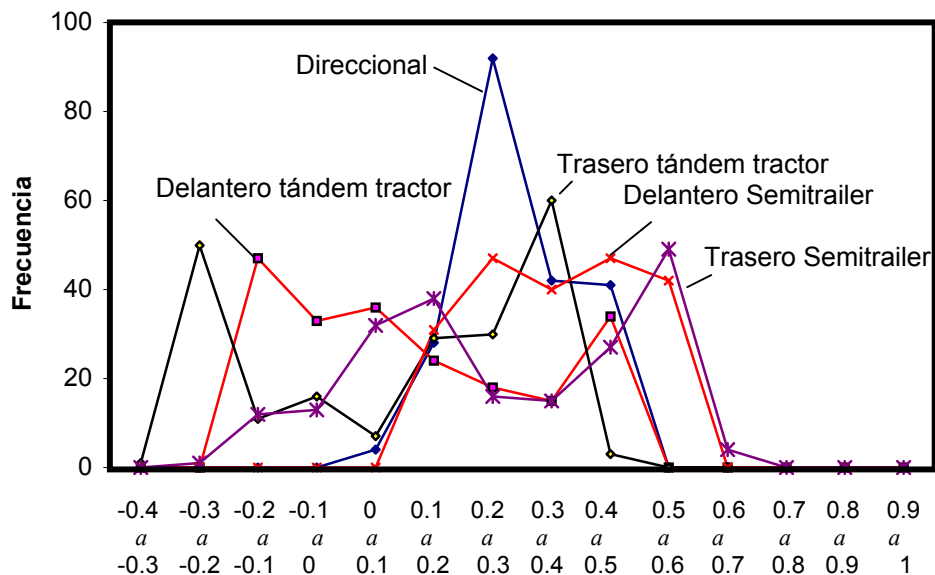
(b)

Figura 7: Variaciones de los coeficientes de correlación para los ejes de los vehículos tipo C3. (a) Distribución; (b) Histograma de frecuencias.

Para los resultados mostrados en la Figura 8 se tiene que sólo el 1.93 % de los ejes de los vehículos tipo T3S2 presentó un coeficiente de correlación mayor de 0.6, concentrándose la mayor cantidad de vehículos en el rango de 0.1 a 0.3.



(a)

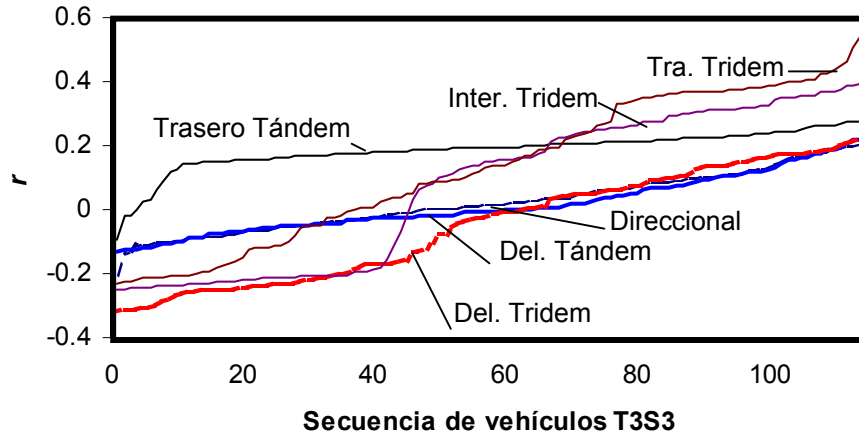


(b)

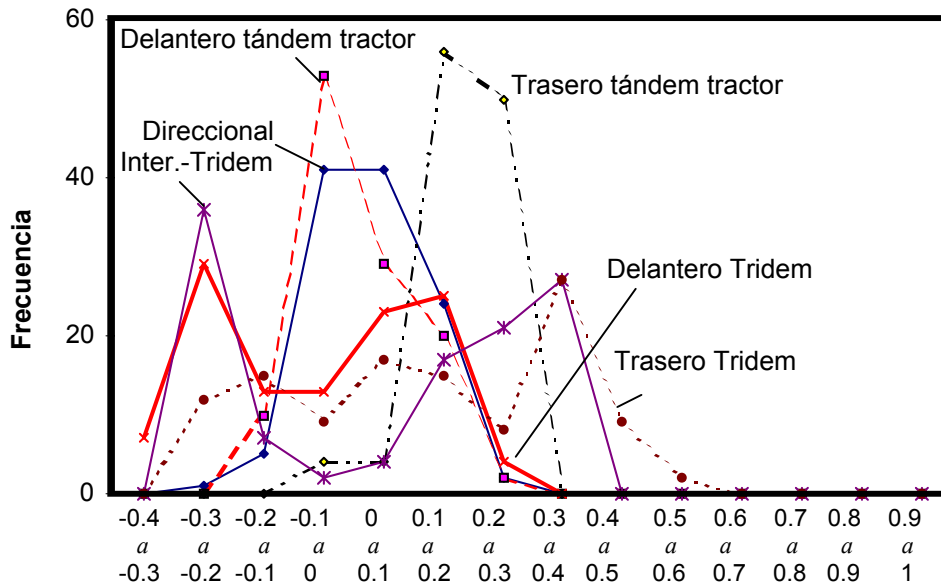
Figura 8: Variaciones de los coeficientes de correlación para los ejes de los vehículos tipo T3S2. (a) Distribución; (b) Histograma de frecuencias.

Los resultados de la Figura 9 muestran que sólo el 1.75 % de los ejes de los vehículos T3S3 presentó un coeficiente de correlación mayor de 0.6. Se puede apreciar que los ejes de este tipo de vehículo exhiben en general los menores

coeficientes de correlación, dentro del volumen vehicular considerado, presentando el valor más alto de r el eje trasero del grupo tridem del semirremlque.



(a)



(b)

Figura 9: Variaciones de los coeficientes de correlación para los ejes de los vehículos tipo T3S3. (a) Distribución; (b) Histograma de frecuencias.

Para el volumen total de vehículos en el tráfico medido, la Figura 10(a) muestra la distribución de los valores de los coeficientes de correlación, mientras que la parte (b) de esta figura muestra estos mismos resultados expresados en términos de los porcentajes del total de vehículos. De esto se desprende que sólo un despreciable porcentaje de vehículos (2.64 %) presentó valores de $r > 0.6$.

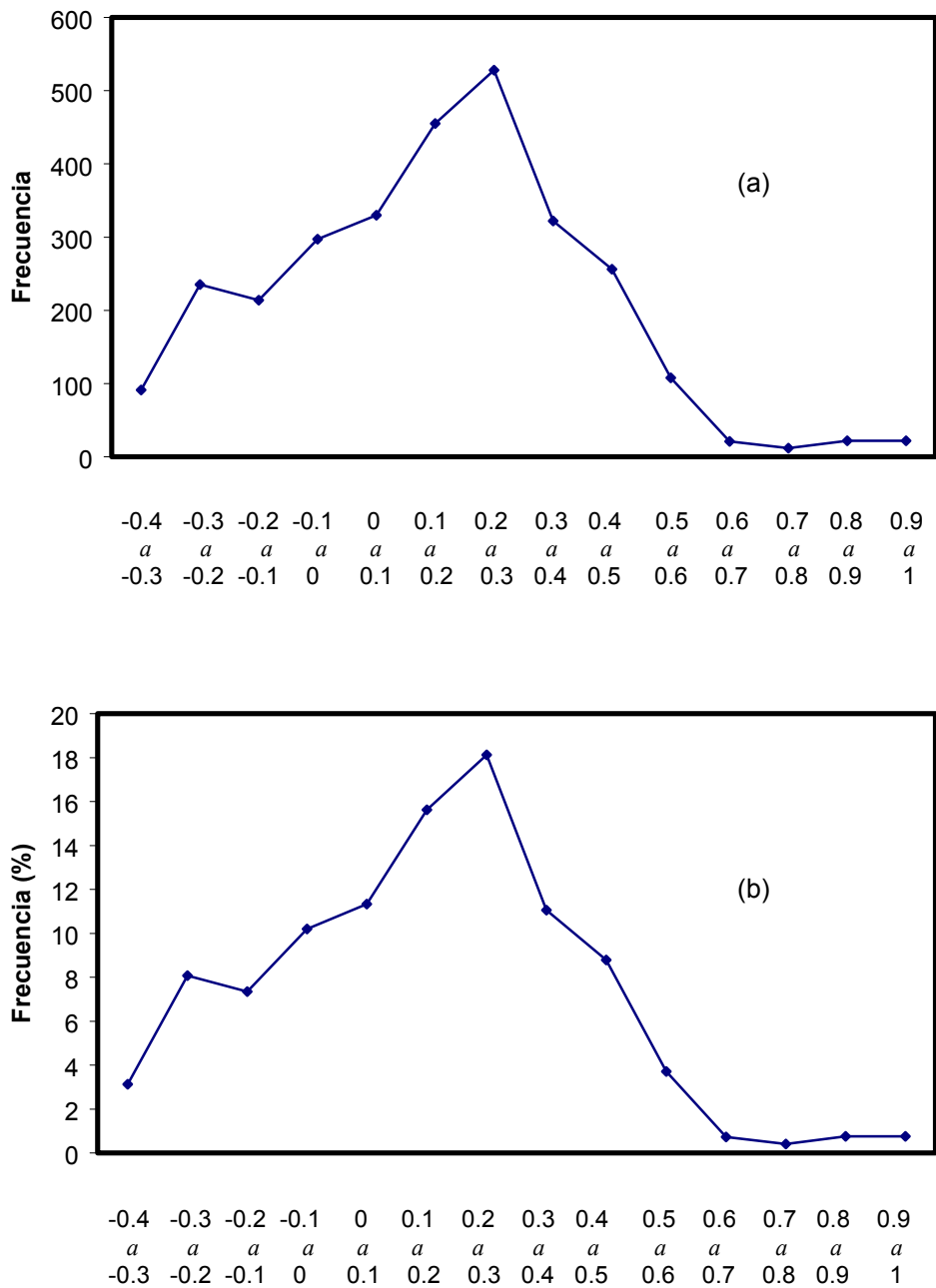
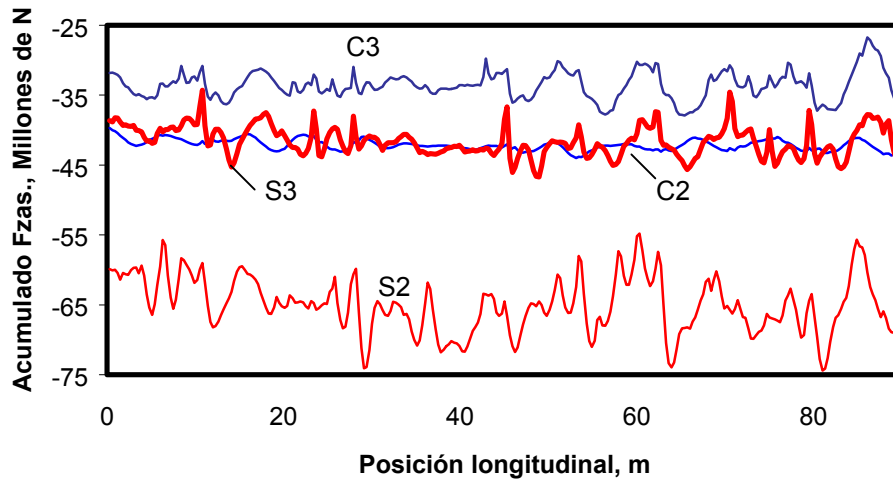


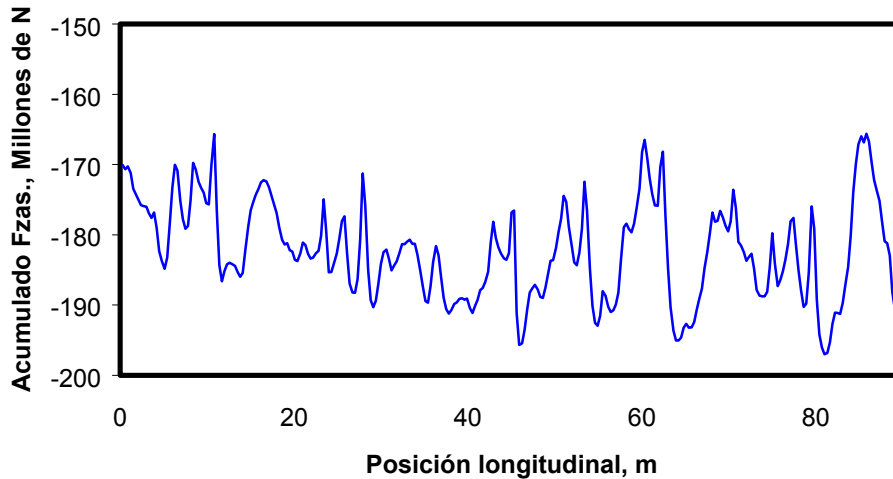
Figura 10: Variaciones de los coeficientes de correlación para los ejes presentes en el tráfico completo.

2.3 Agregación de fuerzas

La Figura 11 muestra los resultados de agregar, para cada segmento de pavimento de 0.3 m de longitud, las fuerzas de cada uno de los ejes de todos los vehículos en el tráfico. La parte (a) de esta figura ilustra los valores totales por cada tipo de vehículo mientras que la parte (b) apunta los valores totales para todos los vehículos.



(a)



(b)

Figura 11: Agregación de fuerzas a lo largo del pavimento. (a) Totales por tipo de vehículo; (b) Totales por todos los vehículos.

Para estos resultados por cuanto a las agregaciones de las fuerzas a lo largo del perfil del pavimento, la Tabla 2 muestra el cálculo de las relaciones de los valores máximos entre los valores mínimos, como una función del tipo de vehículo.

Tabla 2: Relaciones de las fuerzas agregadas sobre el pavimento.

| Relaciones Máximos / mínimos | |
|------------------------------|------|
| C2 | 1.10 |
| C3 | 1.41 |
| S2 | 1.35 |
| S3 | 1.36 |
| GLOBAL | 1.30 |

Así, estos resultados señalan que de manera global, hay partes en el pavimento que sufren el efecto de valores más altos de fuerzas de los vehículos, en una relación del treinta por ciento en promedio respecto a las partes de menor concentración.

2.4 Agregación de fuerzas y Ley de la Cuarta Potencia

La Figura 12 ilustra los resultados de efectuar la agregación de los valores (elevados a la cuarta potencia), de las fuerzas que los vehículos ejercen sobre el pavimento. La Tabla 3 muestra las relaciones máximos/mínimos para estos valores a lo largo del pavimento, indicando una relación de hasta un 239 % en el caso del vehículo C3 y de 138 % para todo el tráfico. Estos resultados implican una importante variación potencial del efecto dañino de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, con lo que podría esperarse una falla prematura de secciones específicas a lo largo del pavimento.

Tabla 3: Relaciones de las fuerzas elevadas a la cuarta potencia.

| Relaciones Máximos / mínimos | |
|------------------------------|------|
| C2 | 1.51 |
| C3 | 3.39 |
| S2 | 2.45 |
| S3 | 2.59 |
| GLOBAL | 2.38 |

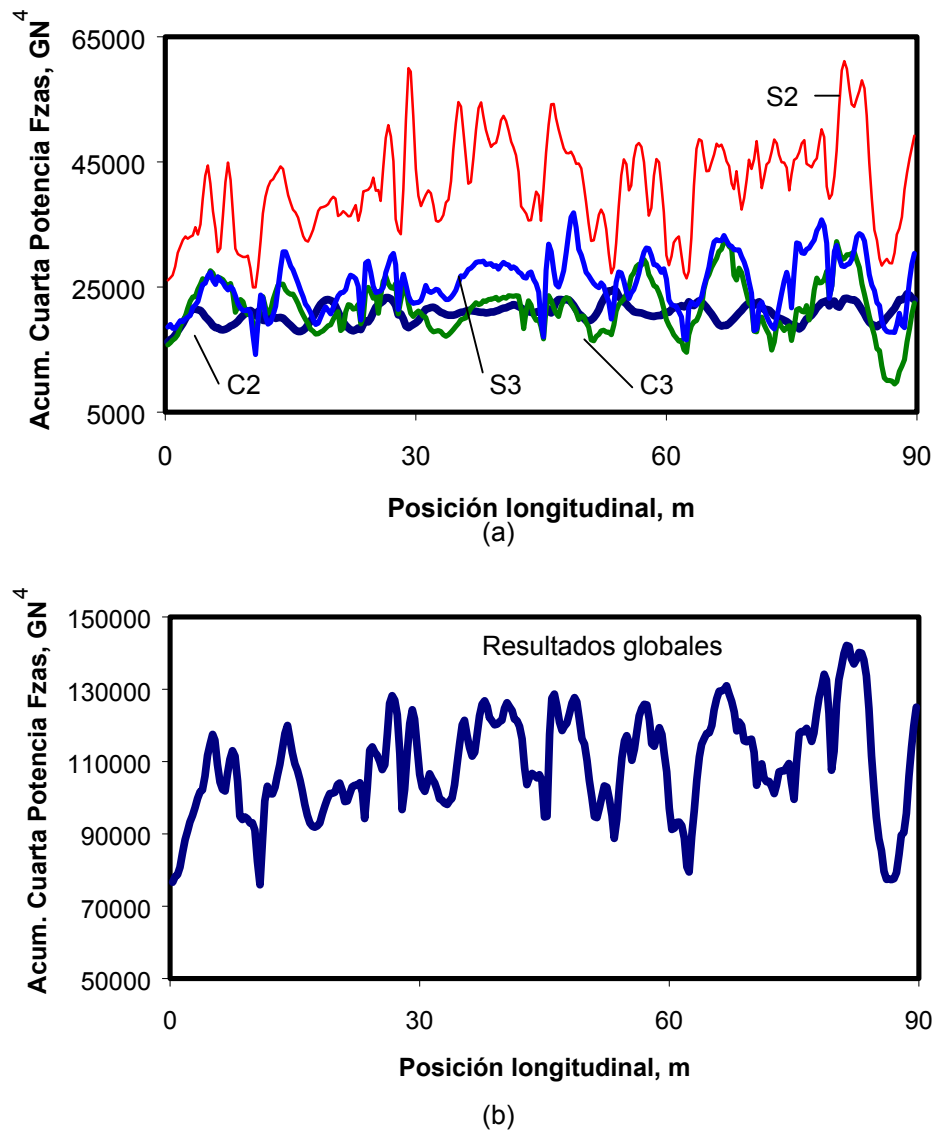


Figura 12: Acumulaciones de fuerzas a lo largo del pavimento:(a) para los distintos tipos vehículos involucrados; (b) globales.

2.5 Energía de deformación del pavimento

En el Apéndice de este trabajo se incluye el modelo propuesto de la energía de deformación que transitoriamente se almacena en el pavimento durante el paso de los vehículos pesados (Romero et al., 2000). Esencialmente, dicho modelo consiste de un esquema computacional en el que un modelo de pavimento discreto, no acoplado, es considerado para la evaluación del potencial efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento. Este modelo de pavimento, para el que algunos elementos de validación se presentan en el apéndice, representa ventajas respecto a otros esquemas, al tomar en cuenta la respuesta dinámica de los pavimentos a las fuerzas de los vehículos. Para este modelo, la Figura 13(a) ilustra los resultados de efectuar la agregación de las energías de deformación a lo largo del pavimento, para cada tipo de vehículo presente en el tráfico descrito en la sección 2.1. La parte (b) de esta figura ilustra los resultados globales.

Atendiendo la distribución espacial de las agregaciones de las energías de deformación asociadas al tráfico considerado, la Tabla 4 muestra la dispersión espacial del potencial efecto de los vehículos sobre el pavimento, evaluando las relaciones de los valores agregados máximos entre los valores agregados mínimos de estas energías. Así, de forma global, habría partes en el pavimento que sufrirían un efecto dañino hasta un 53 % mayor con respecto a la porción del pavimento que sufriera el menor efecto dañino. Asimismo, un flujo consistente únicamente de vehículos tipo C3 o T3S2, representarían relaciones máximas/mínimas mayores del setenta por ciento.

Al comparar los resultados máximos/mínimos de este enfoque con respecto a los enfoques de fuerza descritos anteriormente, éste se ubicaría mayor que el de las fuerzas a la primera potencia y por debajo del enfoque de la cuarta potencia.

Tabla 4: Relaciones de las energías almacenadas en el pavimento

| Relaciones Máximos / mínimos | |
|------------------------------|------|
| C2 | 1.12 |
| C3 | 1.76 |
| S2 | 1.74 |
| S3 | 1.57 |
| GLOBAL | 1.53 |

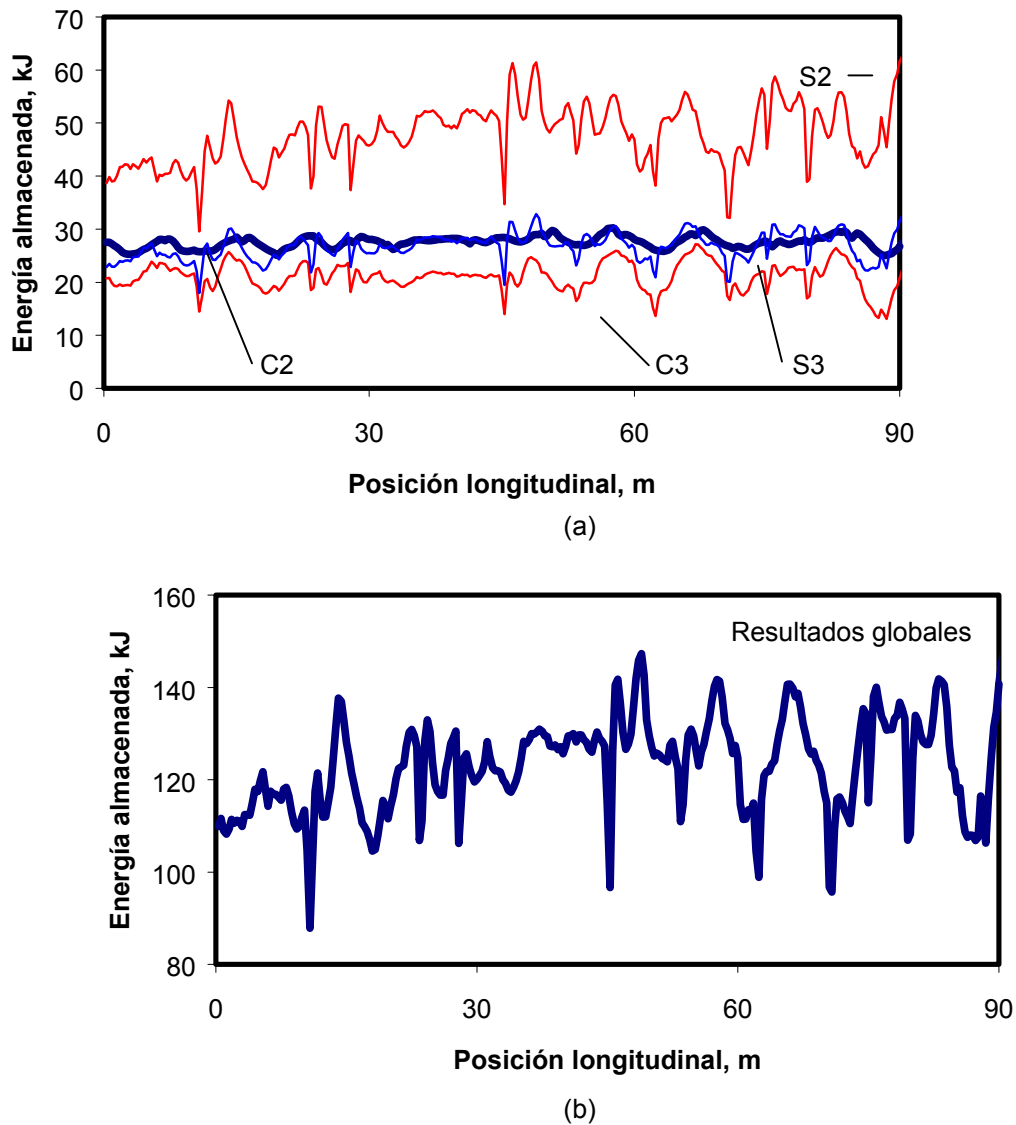


Figura 13: Energías agregadas de deformación a lo largo del pavimento. (a) para los distintos tipos vehículos involucrados; (b) globales.

2.6 Análisis espectral en longitudes de onda

La Figura 14 ilustra los resultados de aplicar un análisis de densidad espectral de potencia en longitudes de onda (DEP), a los resultados del modelo de la energía de deformación descrito en la sección anterior. La razón para haber seleccionado el modelo de la energía para hacer el análisis DEP se deriva de las mejoras que

dicho modelo representa, descritas en la sección anterior, al compararlo con el enfoque simple de las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento. En esta figura 14 se observan dos grupos de “picos”, localizados entre los 5 y 10 metros y entre los 10 y 15 metros. Tales grupos de picos estarían asociados a las frecuencias naturales de vibración de las masas suspendidas y de los ejes de los vehículos presentes en el tráfico, para las condiciones de carga y velocidades consideradas.

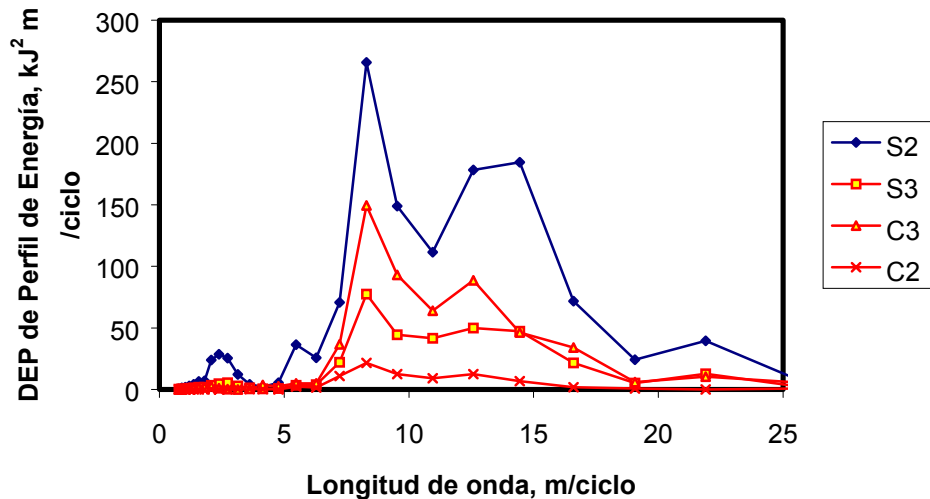


Figura 14: **Contenidos espectrales en DEP de las distribuciones de energía almacenada en el pavimento, para cada tipo de vehículos en el tráfico considerado.**

2.7 Consideraciones finales

Se han presentado diferentes enfoques para el estudio de la distribución espacial del deterioro potencial de los pavimentos, provocado por los vehículos pesados presentes en un flujo vehicular medido. Como una función de la metodología de evaluación considerada, el deterioro global desigual del pavimento, considerando las relaciones entre el máximo y mínimo efecto, variaría desde un treinta por ciento hasta un 138 por ciento. El modelo de la energía de deformación representa un valor intermedio entre estos dos extremos (53 %).

3 Efecto espacial de las propiedades de los vehículos

Como continuación al estudio de la distribución espacial del efecto dañino sobre los pavimentos asociado al paso de los vehículos pesados, en esta sección se atiende el efecto que sobre esa distribución espacial tienen algunas variaciones en las propiedades de los componentes de los vehículos, incluyendo la rigidez y amortiguamiento de las llantas y suspensiones. Estas variaciones en las propiedades están relacionadas tanto con las características de construcción de los componentes como con las condiciones de operación. De esta manera, la variación en las presiones de inflado de las llantas de los vehículos está asociada tanto a condiciones ambientales como a consideraciones normativas (presiones máximas de inflado de los neumáticos). Por otro lado, distintos niveles de rigidez y de amortiguamiento en las suspensiones están asociados con los distintos diseños de estos equipos, en donde una suspensión de aire representa una menor rigidez en comparación con una suspensión de muelles.

Por cuanto a los principios de operación empleados en las suspensiones (de aire o de muelles), una cierta discusión existe en relación a las ventajas asociadas a cada uno de estos esquemas de funcionamiento por cuanto a su agresividad para con el pavimento (LeBlanc y Woodrooffe, 1995). La discusión se ha derivado de que a una reconocida amigabilidad de las suspensiones de aire con los pavimentos, se contraponen el que el uso de tales equipos pudiera implicar una mayor concentración del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento. Adicionalmente, se ha mencionado que una falla en los sistemas de amortiguamiento de las suspensiones de aire, igualmente hace más agresivo a este tipo de suspensiones para con el pavimento (Cole, 1996).

En esta sección se emplea el enfoque del análisis espectral de las distribuciones espaciales de las energías de deformación (presentados en las secciones 2.5, 2.6 y en el apéndice), para el análisis del efecto potencial que variaciones en las propiedades de las llantas y suspensiones tienen sobre la distribución espacial del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento. La justificación para la consideración del modelo de la energía de deformación se desprende de la sensibilidad de ese modelo de pavimento a la velocidad de aplicación de las cargas, aparte de su coincidencia con los resultados experimentales, como se muestra en el Apéndice.

3.1 Propiedades del tráfico

Un esquema de tráfico semejante al empleado en la sección 2 de este trabajo se emplea en esta sección, con la diferencia de que el número de vehículos tipo C2 se incrementó hasta 663, quedando los flujos totales de la siguiente manera:

vehículos C2 (663 vehículos), C3 (198 vehículos), T3S2 (243 vehículos) y T3S3 (114 vehículos), dando un tráfico total de 1218 vehículos pesados (IMT, 1996).

Con objeto de tomar en cuenta variantes realistas en las velocidades individuales de circulación de cada uno de los camiones en el tránsito, una componente aleatoria, normalmente distribuida de ± 10 km/h se sobrepuso a una velocidad promedio de tránsito de 80 km/h. Asimismo, la rugosidad del segmento carretero se representó por tres diferentes perfiles de pavimento, que establecen caminos en buen estado (de rugosidad baja), en regular estado (de rugosidad media) y en mal estado (de rugosidad alta). Al igual que en el caso del estudio presentado en la sección 2, los valores del Índice Internacional de Rugosidad (IIR) de los perfiles carreteros seleccionados se obtuvieron como 0.9, 2.5 y 3.4 mm/m, respectivamente para los caminos de baja, media y alta rugosidad.

La Tabla 5 lista las variaciones en la rugosidad del camino y las propiedades de las suspensiones y llantas consideradas en este estudio, incluyendo su denominación en los análisis posteriores (SD1,SD2,SD3,KT1,KT2,KT3). La rigidez vertical de las llantas corresponde a un eje estándar de cuatro llantas, equipado con llantas nuevas tipo 305/70-R22.5, infladas a 6, 7 y 8 bars (87, 101 y 116 psis) (Rakheja, 1998). El amortiguamiento viscoso de las llantas fue considerado constante, igual a 20 kNs/m. El nivel de rigidez vertical de las suspensiones en esta tabla se refiere a las suspensiones empleadas en los ejes del semirremolque y motrices, ya que la rigidez de la suspensión de los ejes direccionales se consideró igual para todos los vehículos (1000 kN/m). Se hace notar que el menor valor para la rigidez de la suspensión, presentado en la Tabla 5, corresponde a un nivel de rigidez equivalente a una suspensión de aire (Cebon, 1999).

Tabla 5. **Rango de parámetros** †

| | | | |
|--|--------------|------------------------|-------------|
| Rigidez de la suspensión (kN/m) | 2000 (suave) | 3000 (media) † | 4000 (dura) |
| Amortiguamiento de la suspensión (kNs/m) | 10 (SD1) | 30 (SD2) † | 50 (SD3) |
| Rigidez de las llantas (kN/m) | 2960 (KT1) | 3384 (KT2) † | 3800 (KT3) |
| Rugosidad del pavimento (IIR,mm/m) | 0.9 (Baja) | 2.5 (Regular) † | 3.4 (Alta) |

† Los parámetros nominales se indican en negritas

Efectos generales de los parámetros

Las variaciones en los parámetros seleccionados afectan ciertas características de respuesta de los camiones al perfil del pavimento, al tiempo que estos parámetros son los más importantes por cuanto a definir las respuestas características de los camiones al perfil del pavimento, y por lo tanto, su efecto potencial sobre el estado de deterioro del pavimento. De esta manera, mientras que la rigidez de las llantas se relaciona con las frecuencias de resonancia de las masas no suspendidas (ejes) de los vehículos, el amortiguamiento viscoso de la suspensión se sabe afecta la respuesta global de la masa suspendida del vehículo, influyendo por consiguiente las cargas transmitidas al pavimento y su distribución espacial.

3.2 Elementos de análisis

El efecto de las variaciones en las propiedades de los componentes de los vehículos sobre la distribución espacial del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento, se estudia mediante el uso de dos de las metodologías descritas en la sección anterior. Por un lado, se analizan los valores agregados máximos, mínimos y su dispersión a lo largo del perfil del pavimento, empleando para ello dos medidas:

- (I) La variación pico-a-pico en la energía agregada obtenida a lo largo de un perfil de pavimento específico, normalizada con respecto al valor promedio de tal energía agregada, expresada como un porcentaje.
- (II) La relación de la desviación estándar de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento, normalizada a su valor promedio. Tal relación se ha denominado coeficiente de variación (*CDV*):

$$CDV = \left[\frac{\text{Desviación estándar de la energía agregada}}{\text{Energía agregada promedio}} \right] \times 100 \% \quad (9)$$

Se tiene entonces que altos valores de estas dos medidas de variación de las energías agregadas a lo largo del pavimento, implican que partes de éste sufrirán mucho más daño que otras.

Por otro lado, en este análisis se aplica el enfoque del contenido espectral en longitudes de onda de la distribución espacial de la agregación de las energías a lo largo del pavimento, como se describió en la sección 2.5. A continuación se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a estos enfoques descritos.

3.3 Resultados y discusión

Se presentan en esta sección los resultados de los contenidos espectrales y de la dispersión de las energías agregadas a lo largo del pavimento, describiendo de manera inicial el contenido espectral de los perfiles de pavimento empleados.

3.3.1 Análisis espectral de los perfiles de pavimento

Se evalúan en esta sección las características espectrales de los tres perfiles de pavimento considerados en este estudio, empleando para ello un programa de cómputo desarrollado en la Universidad de Michigan (UMTRI, 1996). Estas evaluaciones permiten comparar las características relativas de rugosidad de los distintos perfiles de pavimento seleccionados, así como determinar las longitudes de onda dominantes en cada perfil.

La Figura 15 muestra el análisis de la Densidad Espectral de Potencia en longitudes de onda (DEP) de los pavimentos de baja, media y alta rugosidad utilizados en esta investigación. Se puede observar en estos resultados que los tres perfiles exhiben la presencia de una longitud de onda dominante cerca de los 12.8 m. Las longitudes de onda presentes en estos espectros afectará la respuesta de los vehículos, incidiendo por lo tanto en la distribución espacial del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento. Los resultados en esta figura muestran, asimismo, que el pavimento con mayor rugosidad tiene mayores contenidos espectrales a bajas longitudes de onda, mientras que los contenidos a mayores longitudes de onda tienden a ser similares para los tres perfiles de pavimento considerados.

3.3.2 Análisis espectral espacial de la energía almacenada

Para el rango de parámetros descritos en la Tabla 5 se presenta ahora el análisis espectral de la distribución de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento. Este análisis resulta en un conjunto de 81 corridas de simulación, cada una considerando la distribución completa del tráfico de 1218 vehículos pesados. De manera destacada, el análisis espectral de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento reveló un número de longitudes de onda dominantes para cada perfil de pavimento.

Las Figuras 16 a la 18 ilustran el efecto, que sobre la DEP de la energía agregada, tienen las variaciones en los parámetros de la suspensión y llantas consideradas en este estudio. En esta secuencia de figuras se muestran las longitudes de onda dominantes identificadas para los caminos de rugosidad baja, media y alta, respectivamente. Las longitudes de onda dominantes para cada perfil de pavimento resultaron como sigue: 11.71 m, 10.74 m y 9 m para el pavimento de rugosidad baja; 13.93 m, 10.74 m y 2.25 m para el pavimento de rugosidad media; y de 9 m, 10.74 m y 13.9 m para el pavimento de rugosidad alta.

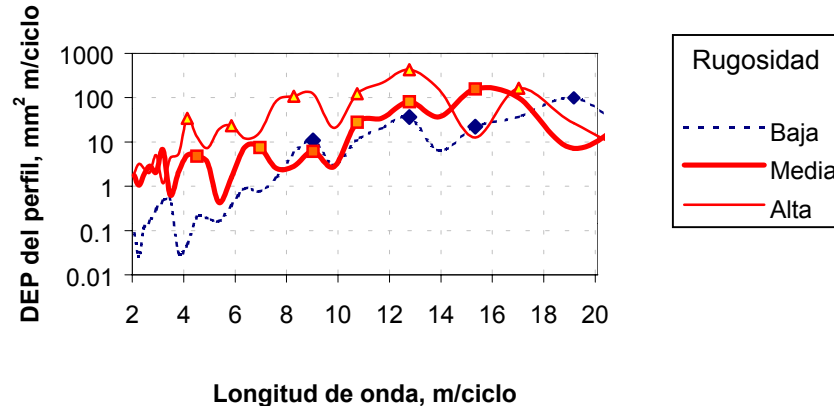


Figura 15: **Análisis de la densidad espectral de potencia (DEP) de los pavimentos utilizados en la investigación.**

La longitud de onda de 10.74 m, común para las tres condiciones de pavimento, corresponde aproximadamente a los 2 Hz de la resonancia vertical de la masa suspendida, para la velocidad promedio de tránsito considerada de 80 km/h.

Resultados para el pavimento de baja rugosidad

En los resultados presentados en la Figura 16 se observa un relativamente pequeño contenido espectral para la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural de vibración de la masa suspendida (10.74 m), lo cual podría atribuirse al relativamente bajo contenido de esa frecuencia específica en el perfil de pavimento de baja rugosidad (Figura 15). Los picos más elevados a longitudes de onda de 11.71 y 9 m, están asociados al contenido espectral, a esas longitudes de onda, del perfil del pavimento (Figura 15).

Para estos resultados del pavimento de rugosidad baja se observa una tendencia en la que, con la excepción de la combinación suspensión suave y longitud de onda de 9 m, los valores del contenido espectral de las longitudes de onda dominantes ilustradas en esta figura, disminuyen al aumentar el amortiguamiento de la suspensión, y crecen al aumentar la rigidez de las llantas. Este efecto diferencial para el caso de la suspensión suave y longitud de onda de 9 metros, es atribuible a los corrimientos en las frecuencias de resonancia de los vehículos presentes en el tráfico mixto considerado, como consecuencia de los cambios en la rigidez de la suspensión. Estos corrimientos estarían también asociados al orden diferencial de los niveles de DEP exhibidos para los diferentes niveles de rigidez de las suspensiones, lo cual se observa al comparar los resultados de la

longitud de onda de 9 m, con aquellos de 11.71 y 10.74 m. De esta forma, se tiene que en el caso de las longitudes de onda de 11.71 y 10.74 m, el contenido espectral de potencia máximo corresponde a la suspensión de rigidez media, mientras que para la longitud de onda de 9 m, el contenido espectral máximo corresponde a la suspensión dura.

Resultados para el pavimento de rugosidad media

La Figura 17 ilustra los resultados de las longitudes de onda dominantes para el caso del pavimento con rugosidad media (13.93, 2.25 y 9.03 m), observándose que la amplitud del contenido espectral de la energía almacenada para el caso de la longitud de onda más grande (13.93 m), disminuye al aumentarse el amortiguamiento de la suspensión, y crece al aumentar la rigidez de las llantas. La longitud de onda de 2.25 metros estaría asociada a la frecuencia natural de vibración de la masa no-suspendida del vehículo (ejes), observándose que su contenido espectral crece al aumentarse la rigidez de la suspensión, el amortiguamiento de la suspensión o la rigidez de las llantas. Se observa en esta figura que en la longitud de onda de 9.03 m, los resortes de la suspensión suave y media producen contenidos espectrales de potencia crecientes al aumentar tanto el amortiguamiento de la suspensión como la rigidez de las llantas, mientras que la suspensión dura muestra tendencias opuestas. Este efecto es atribuido a los cambios en las frecuencias resonantes de vibración de las masas suspendidas de los vehículos, asociadas a los distintos niveles de rigidez de las suspensiones.

Resultados para el pavimento de rugosidad alta

De manera distintiva en el caso del pavimento de rugosidad alta (Figura 18), la magnitud del contenido espectral de potencia correspondiente a una longitud de onda de 10.74 m, disminuye al aumentar el amortiguamiento de la suspensión y puede crecer al aumentar la rigidez de las llantas. Al igual que en el caso de los otros perfiles de pavimento, tales efectos se asocian a las variaciones en las frecuencias naturales de vibración de las masas suspendidas, producto de los cambios en la rigidez de la suspensión.

En el caso de la longitud de onda de 9 metros, los resultados hacen evidentes tendencias similares a aquellas observadas para el pavimento de rugosidad media (Figura 17). Por otro lado, se observa que para una longitud de onda de 13.9 metros, el aumentar el amortiguamiento de una suspensión con rigidez media produce una disminución en el contenido espectral de potencia de la energía almacenada a esa longitud, mientras que una suspensión suave causa un efecto contrario.

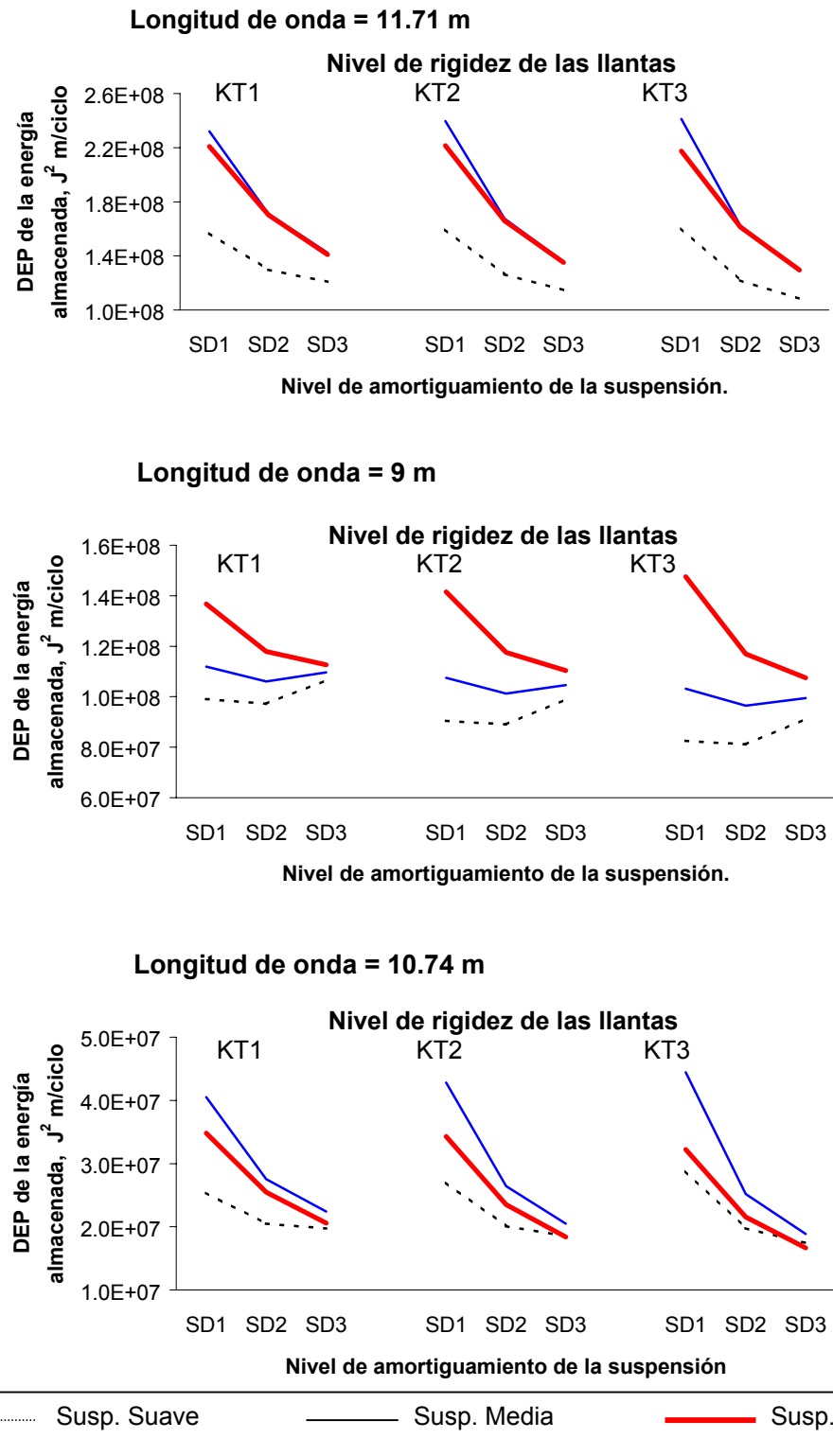


Figura 16: Efecto de las características de la suspensión y llantas sobre el contenido espectral y longitudes de onda de la energía almacenada para un pavimento de rugosidad baja.

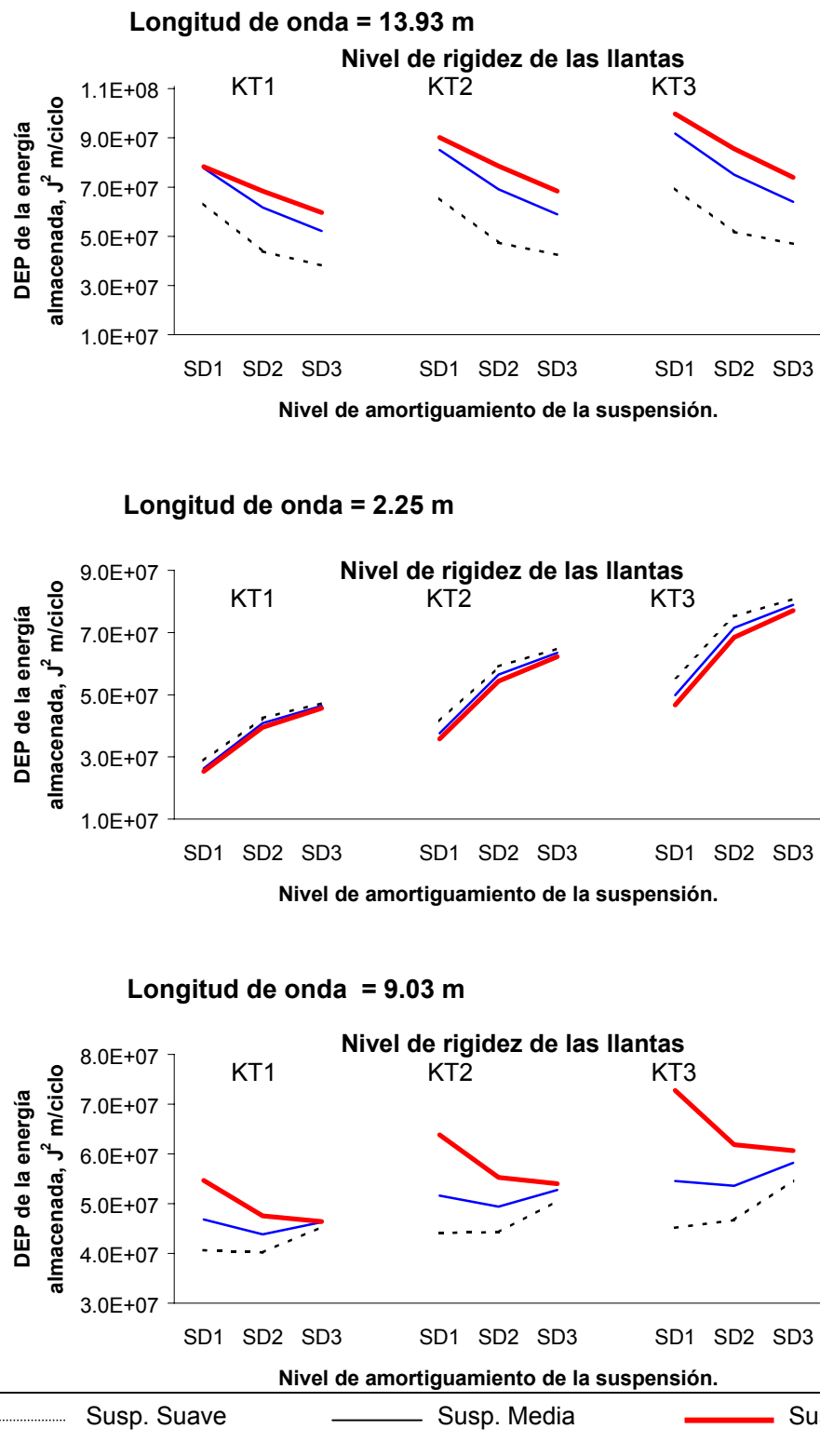


Figura 17: Efecto de las características de la suspensión y llantas sobre el contenido espectral y longitudes de onda de la energía almacenada para un pavimento de rugosidad media.

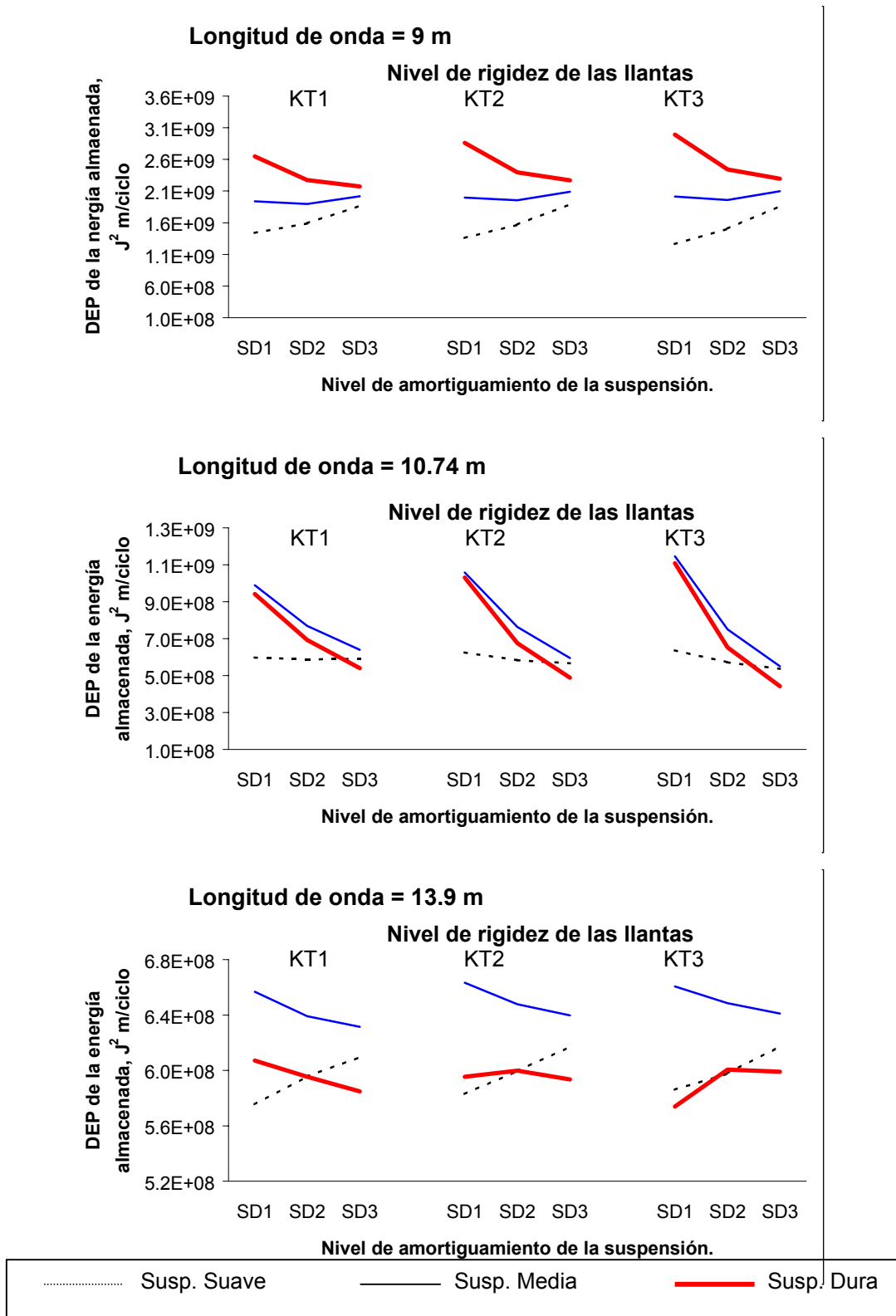


Figura 18: Efecto de las características de la suspensión y llantas sobre el contenido espectral y longitudes de onda de la energía almacenada para un pavimento de rugosidad alta.

A partir de los resultados de las Figuras 16 a la 18, puede observarse que los pavimentos de rugosidad alta y baja sufrirían un daño concentrado en el rango de 8 a 14 metros, mientras que al pavimento de rugosidad media le ocurriría un deterioro concentrado en un rango más amplio de longitudes de onda, desde 2.25 hasta 14 metros. En este grupo de resultados se puede observar que las magnitudes del contenido espectral de potencia de la energía almacenada para el pavimento de rugosidad media, son menores que aquellos obtenidos para los pavimentos de rugosidad baja y alta.

3.3.3 Análisis de la dispersión de la energía agregada

Se presenta ahora el estudio de la dispersión existente en las distribuciones espaciales de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento, para el rango de parámetros descrito en la Tabla 5. Las Figuras 19 y 20 ilustran, como una función de los valores de parámetros de los vehículos y pavimentos considerados, los resultados de los coeficientes de variación (CDV) y las variaciones normalizadas pico a pico en la energía almacenada agregada.

En los resultados presentados en la Figura 19 se puede distinguir un efecto importante de la rugosidad del pavimento sobre los valores de CDV. Estos valores crecen monótonicamente al aumentar ya sea el amortiguamiento de la suspensión o la rigidez de las llantas. Al respecto, el pavimento de rugosidad alta exhibe las variaciones más grandes en los valores de CDV, alcanzando un valor máximo del 9 por ciento. Los caminos de rugosidad alta implican, de esta manera, la máxima variación espacial en el deterioro del pavimento.

Por otra parte, los resultados mostrados en la Figura 20 sugieren que la variación espacial en el deterioro de las carreteras es una función del estado de rugosidad del pavimento y de las características de los componentes del vehículo. Estas variaciones van desde un 40 hasta un 50 por ciento en el caso de un camino de rugosidad alta; de un 9 a un 14 por ciento en el caso de un pavimento de rugosidad baja; y de un 18 a un 22 por ciento para el tráfico que circule por un camino de rugosidad media. De manera latente, estas diferencias en la distribución espacial del potencial efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento, implicarían trabajos de rehabilitación a ser emprendidos en segmentos específicos de los distintos pavimentos.

3.3.4 Efecto global del flujo vehicular

El efecto de las propiedades de las suspensiones y llantas sobre el potencial deterioro de los pavimentos se investiga ahora asumiendo que el valor pico de la energía almacenada agregada a lo largo del pavimento, está asociado con el efecto global del tráfico sobre el pavimento.

La Figura 21 ilustra los picos resultantes de la energía de deformación agregada a lo largo del pavimento, estando normalizados dichos picos a los valores mínimos

de energías agregadas obtenidos para la gama completa de condiciones listadas en la Tabla 5. En estos resultados puede distinguirse una tendencia general, la cual consiste en que el pico de energía almacenada crece al aumentar tanto la rigidez de las llantas como la rugosidad del pavimento; y que el pico disminuye al aumentar el amortiguamiento de la suspensión.

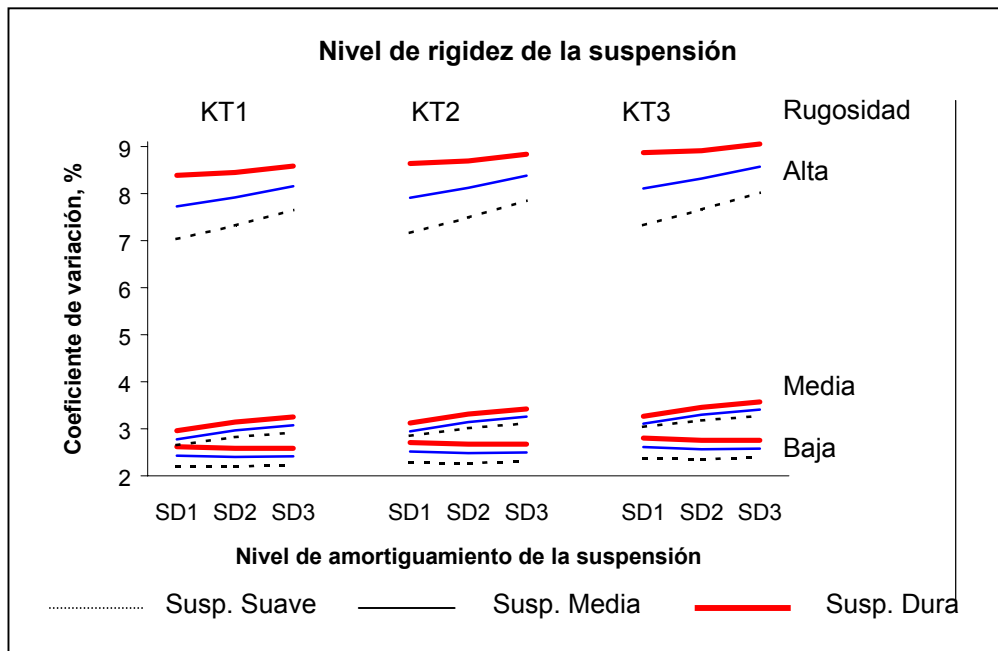


Figura 19: Coeficiente de variación CDV de la energía almacenada agregada como una función de las características del camino y propiedades de rigidez y amortiguamiento de las suspensiones y llantas (Tabla 5).

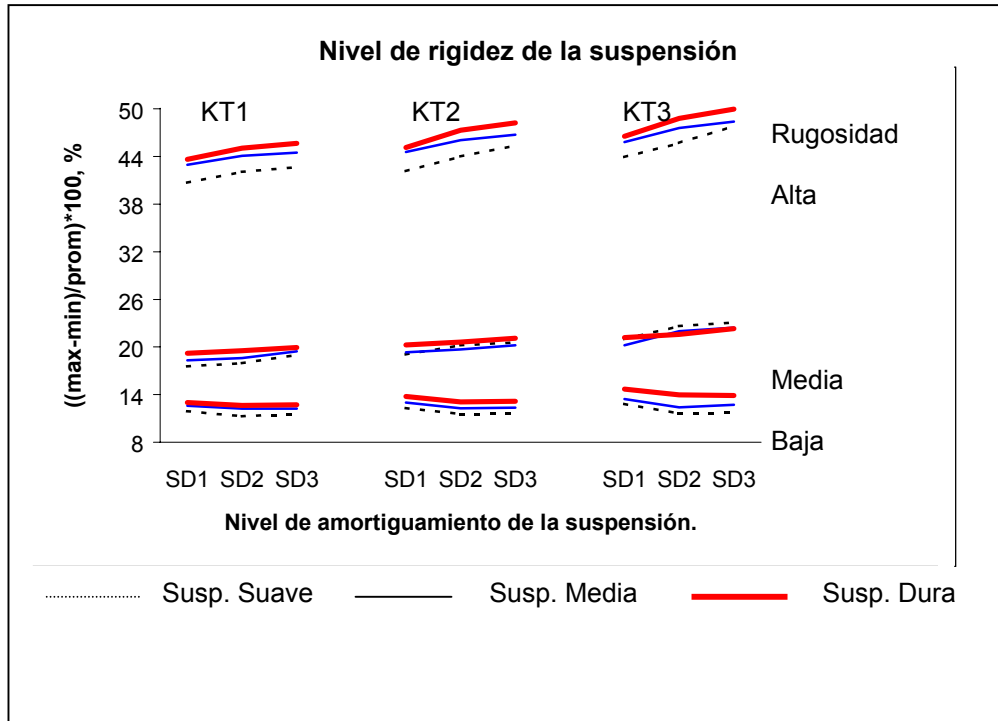


Figura 20: Valores normalizados de la resta máx - mín de la energía almacenada agregada, como una función de las propiedades listadas en la Tabla 5.

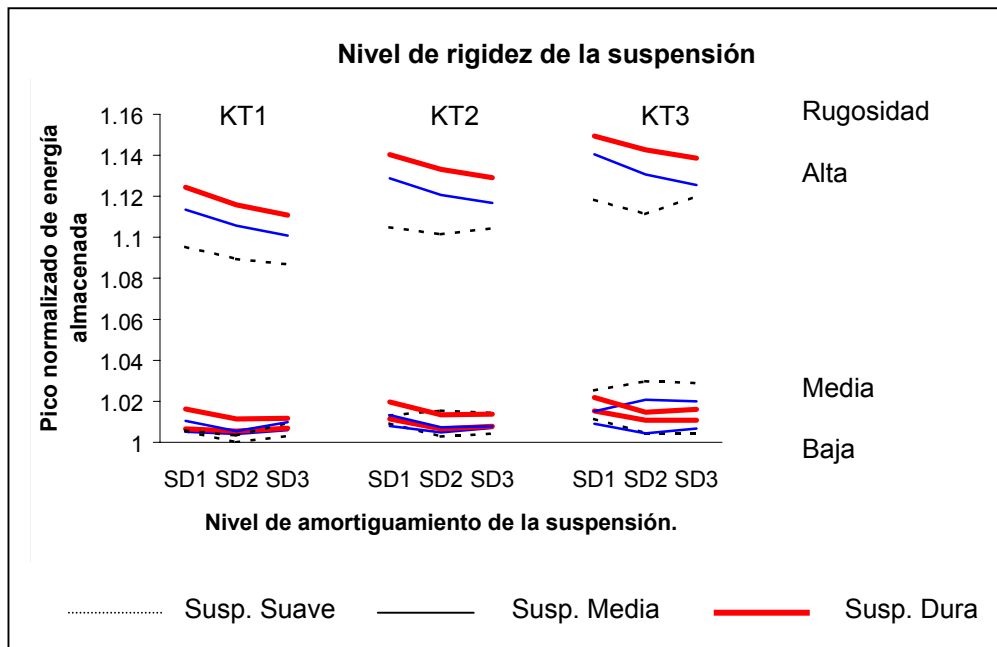


Figura 21: Energía almacenada agregada pico a lo largo del pavimento, normalizada al valor mínimo obtenido para las condiciones de camino y propiedades de suspensión y llantas indicadas en la Tabla 5.

4 Conclusiones

En este trabajo se han revisado distintas metodologías para la evaluación espacial del efecto dañino de los vehículos pesados sobre los pavimentos, considerando un flujo mixto y numeroso de camiones. Estas metodologías parten de la distribución espacial de variables asociadas a la interacción vehículo-pavimento. Una de estas variables consiste en la fuerza aplicada sobre el pavimento por cada uno de los ejes de los vehículos, la otra consiste en la energía que se almacena en el pavimento, producto del paso de los vehículos, de acuerdo a un modelo de análisis propuesto en este trabajo. Para cada una de estas variables se generan “perfiles” a lo largo del pavimento, los cuales son estudiados desde distintos enfoques. El primero de tales enfoques consiste en analizar la similitud, mediante coeficientes de correlación, de los distintos perfiles de fuerza a lo largo del pavimento, asociados al paso de los distintos vehículos. Un segundo enfoque por cuanto a las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, consiste en establecer su distribución espacial, considerando la agregación en el espacio de todas las fuerzas de los vehículos en el tráfico considerado. Un tercer enfoque utiliza la Ley de la cuarta potencia para las fuerzas de los vehículos sobre el pavimento, obteniendo la agregación a lo largo del pavimento de las fuerzas de los vehículos, pero elevadas a la cuarta potencia. Como cuarto enfoque se presenta la distribución espacial de las agregaciones de energía almacenada a lo largo del pavimento, de acuerdo a un modelo propuesto en este trabajo. Para los enfoques segundo al cuarto, el objetivo de los estudios es determinar los valores máximos y mínimos agregados a lo largo del perfil del pavimento, los cuales sean indicadores del efecto espacial de los vehículos sobre el pavimento. Un quinto enfoque presentado en este trabajo, consiste en analizar el contenido espectral en longitudes de onda de los perfiles de energía resultantes a lo largo del pavimento. Este último enfoque permite identificar los componentes espectrales en el perfil del pavimento y de respuesta del vehículo, los cuales afectan el potencial deterioro de los pavimentos.

Como aplicación de estas distintas metodologías, en este estudio se ha modelado el efecto potencial que las características de diseño de los vehículos tiene sobre la distribución del deterioro de los pavimentos a lo largo de su longitud, considerando para ello el modelo de la energía de deformación propuesto en este trabajo.

Los resultados de las distintas metodologías empleadas en este trabajo indican que el deterioro potencial del pavimento ocasionado por un tráfico mixto, depende de la metodología de análisis empleada. Mientras que la metodología de la correlación de las fuerzas agregadas a lo largo del pavimento muestra que la correlación entre estos perfiles es pequeña (con el coeficiente de correlación siendo mayor de 0.6 para sólo el 2.4 por ciento del flujo total de vehículos considerados), los máximos y mínimos denotan un efecto espacial más pronunciado, aunque dependiente de la metodología empleada: de un treinta

por ciento en el caso de las fuerzas acumuladas, del 53 por ciento en el caso de las energías almacenadas, y del 138 por ciento en el caso de las acumulaciones derivadas de la Ley de la Cuarta Potencia. Estos porcentajes, sin embargo, irremediablemente indican que hay un importante efecto espacial del deterioro del pavimento, provocado por un flujo mixto de vehículos pesados.

Los potencialmente desiguales deterioros a ser encontrados a lo largo del pavimento, derivados de los esquemas de análisis descritos, apuntan hacia la falla prematura de porciones de pavimento, producto de la interacción dinámica de éste con los vehículos.

Por cuanto al estudio del efecto que variaciones en las propiedades de los componentes de los vehículos, tendrían sobre la distribución espacial del deterioro de los pavimentos, se obtuvo que los contenidos espectrales de la energía agregada a lo largo del pavimento muestran ciertas longitudes de onda dominantes, en el rango de 2.5 a 13.9 metros. Tales longitudes de onda se asocian a las resonancias de vibración de las masas suspendida y no suspendida (eje) de los vehículos, y a los contenidos espectrales de los perfiles de pavimento. Las variaciones en el amortiguamiento de la suspensión y rigidez de las llantas indujeron variaciones, sobre los respectivos valores de densidad espectral de las diferentes longitudes de onda, en un rango de entre el 20 y el 50 por ciento. Las tendencias diferenciadas como una función de la rigidez de la suspensión, en el caso de las longitudes de onda alrededor de los 9 metros, se atribuye a los corrimientos en los valores de las frecuencias resonantes de los vehículos considerados en el tráfico mixto.

El análisis de la dispersión de la energía almacenada a lo largo del pavimento, con respecto a su valor promedio, evidenció que las características de las llantas y suspensiones pudieran afectar de manera desigual el deterioro de los pavimentos: en un rango entre el 40 y 50 por ciento para un pavimento de rugosidad alta; de 9 a un 14 por ciento para un pavimento de rugosidad baja; y entre un 18 y 22% para un pavimento de rugosidad media. Dentro de estos límites de concentración espacial del potencial deterioro del pavimento, se observó que el efecto de las características de la suspensión y llantas fue una función de la rugosidad del pavimento. Así, para un camino de rugosidad alta se observó que el aumentar el amortiguamiento de la suspensión causó en general una reducción en el daño potencial del pavimento, mientras que un aumento en la rigidez de las llantas condujo a un aumento en el deterioro potencial del pavimento. Tal comportamiento no fue observado para el pavimento de rugosidad media, para el que un aumento en el amortiguamiento de la suspensión provocó un aumento en el deterioro potencial del pavimento. Esta respuesta distintiva del pavimento de rugosidad media hace patente la importancia que tienen, en el estudio de la distribución espacial del deterioro de pavimentos, las características de contenido espectral asociadas a cada uno de los pavimentos considerados. Asimismo, la necesidad de extender el análisis a una más alta variedad de características de rugosidad de las carreteras.

Como trabajos futuros acerca de la distribución espacial del efecto de los vehículos sobre los pavimentos, se ha identificado la necesidad de emplear el modelo de la energía de deformación, una vez que sean tomadas en cuenta las variaciones espaciales en las propiedades del pavimento.

Referencias

Carpenter, S., 1992. 'Load equivalency factors and rutting rates: The AASHO road test', Transportation Research Record. TRB. NRC.

Cebon, D., 1993. 'Interaction between heavy vehicles and roads', SAE paper SP-951.

Cebon, D., 1999. Handbook of vehicle-road interaction. Swetz and Zeitlinger.

Cole, D.J.; Collop, A.C.; Potter, T.E.C.; y Cebon, D., 1996. 'Spatial repeatability of measured dynamic tyre forces'. IMechE J. Auto.Eng, Vol 210 (D3).

Collop, A.C., 1993. Effects of traffic and temperature on flexible pavement wear. Ph.D. Thesis. Cambridge University.

Chavarría, J, Mendoza, A. y Mayoral, E, 1996, "Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en carreteras nacionales", Publicación Técnica IMT No. 89.

Gillespie, T.D., et al., 1993. 'Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance', NCHRP Report 353, TRB, NRC.

Gyenes, L. y Mitchell, C.G.B., 1994. 'The spatial repeatability of dynamic pavement loads caused by heavy goods vehicles'. Heavy vehicle systems. Special series, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 1, No. 2.

IMT, 1996. Estudio de pesos y dimensiones de vehículos pesados en la red federal de caminos. Instituto Mexicano del Transporte.

Jacob, B., 1995. 'Spatial repeatability of the impact forces on a pavement and multiple sensor WIM- Research element 5 of the PECD IR6 DIVINE project'. Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor.

Kenis, W.J.; Mrad, N.; y El-Gindy, M., 1998. 'Spatial repeatability of dynamic wheel loads for heavy vehicles: a literature review'. The International Journal of Vehicle Design. Volume 5. No. 2.

Kulakowski, B.T.; Streit, D.A.; Wollyung, R.J.; y Kenis, W.J., 1995. 'A study of dynamic wheel loads conducted using a four-post road simulator'. Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor.

LeBlanc, P.A. y Woodrooffe, J.H.F., 1995. 'Spatial correlation of dynamic wheel loads'. Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor.

Lin, W-K; Chen, Y-C; Kulakowski, B.T.; y Streit, D.A., 1994. 'Dynamic wheel/pavement force sensitivity to variations in heavy vehicle parameters, speed and road roughness'. The International Journal of Vehicle Design. Volume 1. No. 2.

Meirovitch, L., 1986. Elements of vibration analysis. Mc Graw Hill Int., 2nd ed.

Moran, T.; Sullivan, M; Mahoney, J.; y Chatti, K., 1995. 'A demonstration of the theory of spatial repeatability'. Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor.

OECD, 1998. Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE). Technical report.

Rakheja, S., 1998, Urban bus optimal passive suspension study: phase I. Report. CONCAVE Research Centre. Concordia University. Montreal. Canada.

Romero, J.A. y Lozano, A., 2000, 'Study of road damage potentials of mixed traffic'. Memorias, 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition'. Orlando, 2000.

Romero, J.A. y Lozano, 1996 "Modelos de la respuesta dinámica de los vehículos pesados al perfil del pavimento", Reporte interno.

SCT., 1997, Norma oficial mexicana para vehículos de transporte pesado que circulan por la red federal de carreteras.

UMTRI, 1996. RoadRuf: Software for analyzing road profiles. University of Michigan Transportation Research Institute.

Wang, T.L.; Shahawy,M.; y Huang, D.Z., 1992. 'Dynamic response of highway trucks due to roads surface roughness'. Computers and Structures. Vol. 49. No. 6.

Wong, J.Y., 1993. Theory of ground vehicles. John Wiley and Sons. , 2nd ed.

Apéndice: Modelo de la Energía de Deformación

El esquema computacional propuesto por cuanto al análisis de la interacción vehículo-pavimento con relación a los efectos espaciales involucrados, comprende tres conjuntos de formulaciones: modelos de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, un modelo dinámico de pavimento y una medida de desempeño, la cual se basa en la energía de deformación elástica, que se almacena transitoriamente en el pavimento durante el paso de los vehículos pesados. El esquema de simulación consiste entonces en un modelo de pavimento orientado a la solución computacional de las fuerzas aplicadas sobre éste por los vehículos pesados y la energía almacenada en el mismo. Este enfoque ha sido reportado anteriormente (Romero et al., 2000).

A.1 Modelado de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento

Un conjunto de modelos analíticos, asociados a los vehículos presentes en un flujo vehicular mixto, ha sido formulado para estudiar las interacciones entre distintas configuraciones vehiculares y el pavimento. Los modelos de los vehículos son formulados para estudiar su dinámica de vibración vertical y de oscilación transversal, al estar sometidos a perturbaciones provenientes de un perfil aleatorio de pavimento, en donde se asume que son despreciables las contribuciones provenientes de la oscilación longitudinal de los vehículos (Lin, et al., 1994). Los modelos de los vehículos se desarrollan bajo la consideración de que la respuesta dinámica del vehículo al perfil del pavimento, es independiente de la deformación sufrida por el pavimento por efecto de las fuerzas del vehículo. La justificación para lo anterior se desprende del hecho de que la magnitud de las deformaciones del pavimento (en el orden de 0.1 mm), es significativamente más pequeña que aquella observada en las llantas y componentes de la suspensión de los vehículos (Gillespie, et al., 1993).

La Figura A1 ilustra esquemáticamente las configuraciones vehiculares modeladas, designadas de acuerdo a la normatividad vigente (SCT, 1997). Estos vehículos han sido idealizados como un conjunto de cuerpos rígidos acoplados por elementos flexibles carentes de masa (Cebon, 1993; Wang et al., 1992). Las suspensiones y llantas empleadas en los distintos vehículos son representadas por constantes lineales de rigidez y de amortiguamiento. En la Figura A2 se muestran los modelos discretos de vibración plana de los vehículos considerados, ilustrando sus características dimensionales y grados de libertad (GDL). Estos grados de libertad se refieren a los desplazamientos que puede tener un sistema multicuerpos y que describen su estado dinámico de vibración. La combinación vehicular que comprende un tractor de tres ejes y un semirremolque de dos ejes (vehículo T3S2), mostrado en las figuras A1 y A2, representa un sistema dinámico de nueve grados de libertad (GDL). Para este tipo de combinación vehicular, el semirremolque se asume que incorpora una suspensión

de cuatro resortes, mientras que el tractor incorpora en sus ejes motrices una suspensión de viga oscilante (*walking beam*). Estas suspensiones son los modelos más comunes usados en México. Los 9 GDL asociados con el modelo plano del vehículo tipo T3S2 incluyen entonces el movimiento vertical del eje direccional (z_1), los movimientos verticales y de cabeceo de la suspensión tipo viga oscilante (z_2 y θ_2), los movimientos verticales de las masas de los ejes del semirremolque (z_3 y z_4), el movimiento vertical y de cabeceo de la masa suspendida del tractor (z_t y θ_t), el movimiento de cabeceo de la masa del semirremolque (θ_s), y el movimiento oscilatorio de la barra ecualizadora de la suspensión de cuatro resortes del semirremolque (θ_3). Los modelos en el plano de cabeceo para los vehículos C2, C3 y T3S3 son obtenidos de la misma manera, resultando en sistemas de cuatro-, cinco-, y diez-GDL, respectivamente, como se ilustra en la Figura A2.

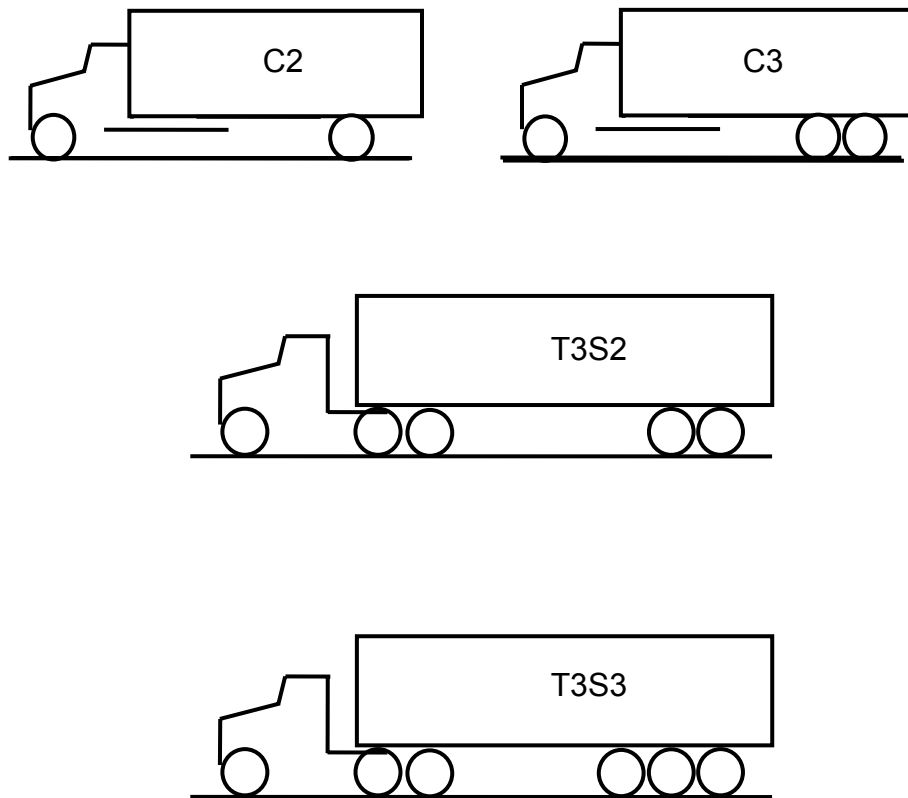


Figura A1: Representación de los vehículos en la muestra de tráfico.

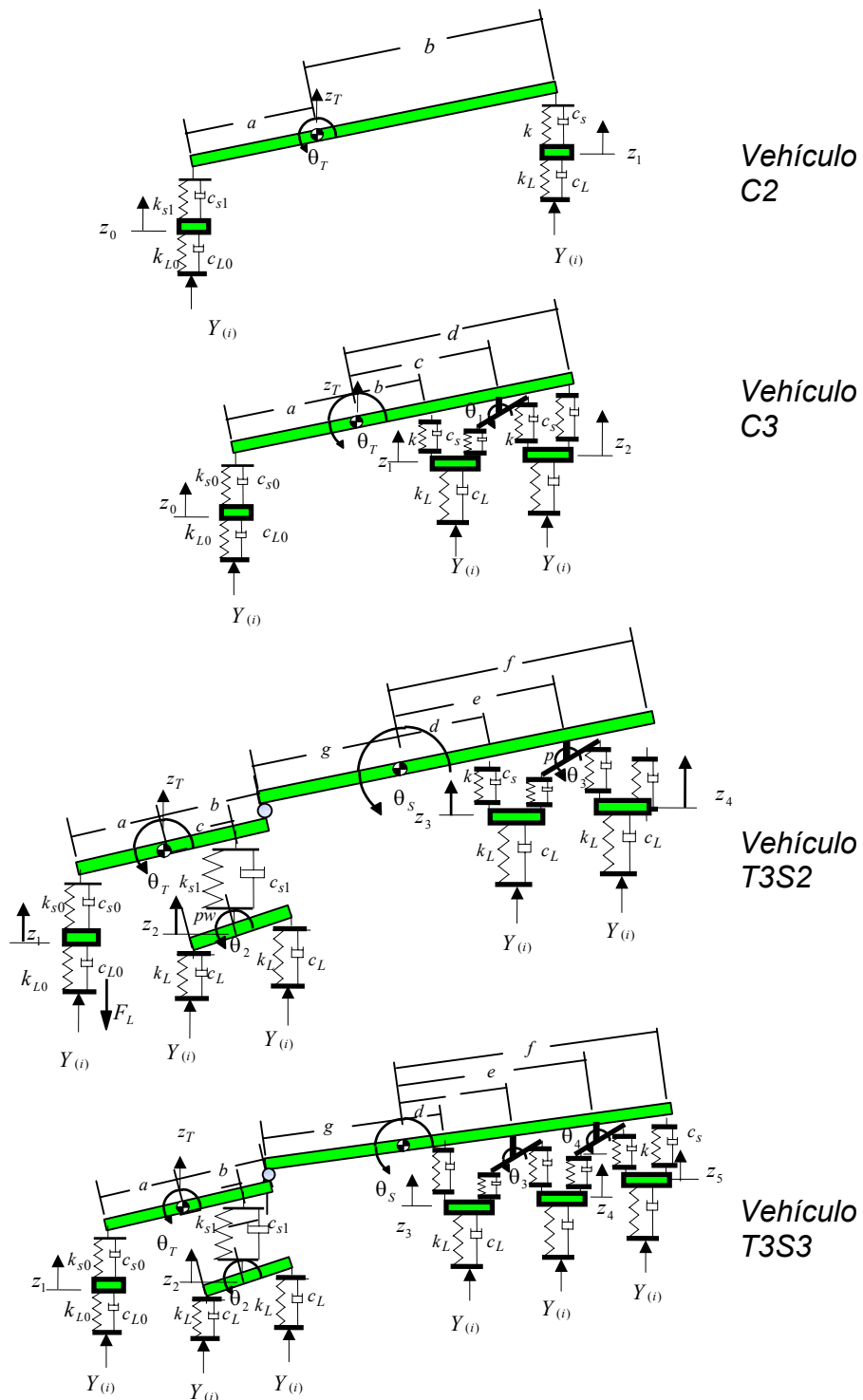


Figura A2: Modelos en el plano de oscilación transversal de los vehículos simulados.

Para derivar las ecuaciones de movimiento de estos sistemas multi-cuerpos, se ha empleado un enfoque Newtoniano. Esto es, estas ecuaciones se derivaron al igualar las fuerzas existentes en el sistema de cuerpos al producto de la inercia por la aceleración. Las ecuaciones de movimiento resultantes, asociadas a los modelos de los distintos vehículos, son resueltas usando el Método de las Matrices de Transición (Meirovitch, 1986). De acuerdo con este método analítico, las ecuaciones de movimiento se expresan como una ecuación matricial de primer orden. Las matrices de respuesta libre (de transición) y de respuesta forzada (particular), se obtienen usando una expansión en Serie de Taylor y una integral de convolución, respectivamente. La forma general de una expresión matricial de primer orden para las ecuaciones de movimiento, es la siguiente:

$$\{ y(t) \} = [A] \{ y(t) \} + [B] \{ Y(t) \} \quad (A1)$$

donde $[A]$ y $[B]$ son las matrices de coeficientes, $\{ y(t) \}$ es el vector de estado y $\{ Y(t) \}$ es el vector de perturbación del sistema. La solución discreta en el tiempo del vector de estado $\{ y(t) \}$ puede ser expresada como (Meirovitch, 1986):

$$\{ y(t+\Delta t) \} = [\Phi] \{ y(t) \} + [\Gamma] \{ Y(t) \} \quad (A2)$$

donde $[\Phi]$ es la matriz de transición y $[\Gamma]$ es la matriz de respuesta particular. La fuerza dinámica que un eje del vehículo ejerce sobre el pavimento, se obtiene asumiendo propiedades lineales para la rigidez y amortiguamiento de las llantas, esto es:

$$F_{Lij}(t) = k_{ij}(z_{ij}(t) - Y_{ij}(t)) + c_{Li} \frac{d}{dt}(z_{ij}(t) - Y_{ij}(t)); \quad i = 1, 2, \dots, n_{aj}; j = 1, 2, \dots, n_v \quad (A3)$$

en donde $F_{Lij}(t)$ es la fuerza dinámica debida a las llantas del eje i del vehículo j . $z_{ij}(t)$ representa la coordenada del desplazamiento vertical de la masa del eje i del vehículo j . $Y_{ij}(t)$ es la elevación del pavimento que corresponde al punto de contacto con la llanta del eje i del vehículo j . n_{aj} es el número total de ejes del vehículo j y n_v es el número total de vehículos pesados muestreados dentro del tráfico mixto.

A.2 Modelo de pavimento

El pavimento es modelado como una serie de elementos asfálticos no-acoplados de una sola capa. La justificación para la consideración de una sola capa de pavimento, se desprende de que la dependencia de la velocidad de aplicación de

la carga sólo se da en la capa asfáltica (Cebon, 1999). Las propiedades de rigidez de tales elementos de pavimento asfáltico, se sabe, varían al alterar muchos factores de operación, tales como la temperatura del pavimento, el contenido de huecos, el índice de penetración y la duración de la aplicación de la fuerza (Collop, 1993). En este modelo de deformación de los elementos de pavimento se considera que tal deformación varía linealmente con la fuerza de la llanta, mientras que las variaciones debidas a otros factores (temperatura, duración de la carga, etc) se consideran no-lineales, usando para tales dependencias las relaciones empíricas publicadas por Collop (1993). La Figura A3 ilustra el modelo de pavimento considerado, como una serie de elementos de asfalto no acoplados, sujetos a la fuerza de la llanta en movimiento. La interfase llanta-pavimento se representa por una presión uniforme de la llanta sobre el elemento de pavimento. La longitud del elemento de pavimento se selecciona de tal manera que coincida con la longitud de la huella de contacto de la llanta del vehículo que transite. La fuerza dinámica de la llanta es, por lo tanto, aplicada a un solo elemento de pavimento a la vez.

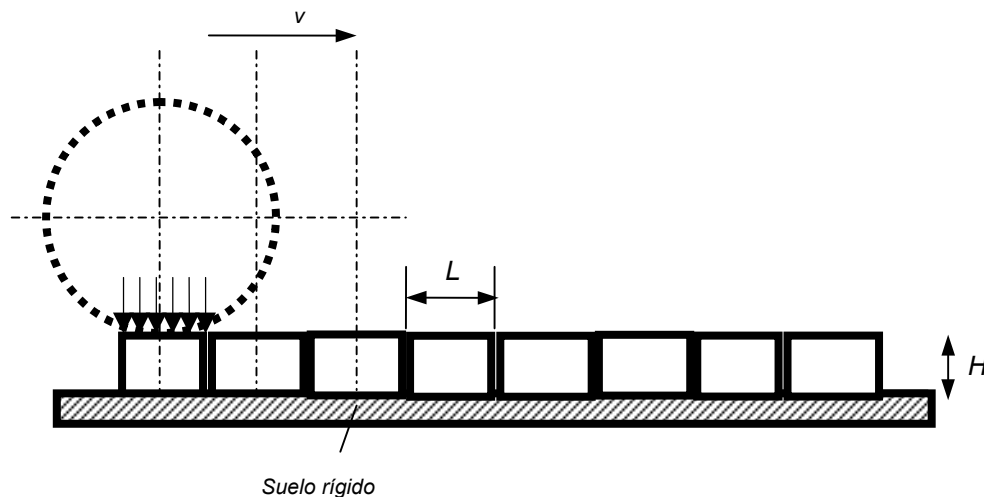


Figura A3: Modelo de pavimento que comprende una serie de elementos asfálticos no acoplados.

A.3 Análisis de la energía almacenada en el pavimento

La energía almacenada dentro de cada elemento de pavimento del modelo se calcula mediante el análisis de cada elemento de pavimento sujeto a la fuerza dinámica proveniente de las ruedas individuales de los vehículos muestreados. El módulo elástico de la mezcla asfáltica se determina a partir de una relación empírica reportada en la literatura (Collop, 1993):

$$E = E_b [1 + (257.5 - 2.5 \cdot VMA) / n(VMA - 3)]^n \quad (A4)$$

en donde E_b es el módulo de elasticidad del aglutinante asfáltico, $n = 0.831 \log[(4 \cdot 10^4) / E_b]$, y VMA describe el contenido de huecos en la mezcla, expresado en por ciento. El módulo E_b ha sido relacionado con la temperatura de la capa asfáltica, el índice de penetración y el tiempo de carga, a través de la siguiente ecuación empírica (Collop, 1993):

$$E_b = 1.157 \cdot 10^{-7} \cdot t_\ell^{-0.368} \cdot 2.718^{-PI^{(R)}} (T_{RB}^{(R)} - T_A)^5 \quad (A5)$$

donde $T_{RB}^{(R)}$ es la temperatura de suavización del asfalto recuperado, T_A es la temperatura de la mezcla asfáltica, $PI^{(R)}$ es el índice de penetración del asfalto recuperado, y t_ℓ es el tiempo de aplicación de la carga. La relación esfuerzo-deformación de los elementos de pavimento se considera que obedece una relación Hookeana, en donde el esfuerzo σ se calcula como una función de la fuerza en la llanta y del área de la sección transversal nominal de los elementos de pavimento. Esta relación lineal se justifica al tomar en cuenta las pequeñas magnitudes de las deformaciones involucradas.

Considerando que un segmento de pavimento está representado por varios elementos discretos, y que cada elemento está sujeto a las fuerzas dinámicas de las diferentes llantas de los distintos vehículos en el tráfico mixto, la energía almacenada en el elemento k -ésimo puede ser expresada como:

$$V_k = \sum_{j=1}^{n_v} \sum_{i=1}^{n_a} (1/2) \cdot (\sigma_{ijk})^2 \cdot E \quad (A6)$$

donde σ_{ijk} es el esfuerzo en el elemento k del modelo de pavimento, ejercido por el eje i del vehículo j . E en esta ecuación es la rigidez del material del pavimento, derivada de la Ecuación (A4). La energía almacenada total para un cierto segmento de carretera se evalúa entonces como la suma de energías almacenadas dentro de los elementos que componen dicho segmento de pavimento, de tal manera que:

$$V_\ell = \sum_{k=1}^{n_e} \sum_{j=1}^{n_v} \sum_{i=1}^{n_a} \frac{E}{2} \cdot \sigma_{ijk}^2 \quad (A7)$$

donde V_ℓ es la energía total almacenada de un segmento de carretera y n_e es el número de elementos considerados en el modelo del segmento de pavimento.

A.4 Validación del enfoque de la energía de deformación

Se muestra ahora una correlación entre la energía total almacenada dentro del pavimento en estado transitorio y el daño sufrido por el mismo, de acuerdo a relaciones empíricas reportadas por Carpenter (1992), quien basó a su vez sus relaciones en la Prueba ASSHO. Estos resultados de Carpenter se refieren a un tipo específico de deterioro de pavimento, consistente en la formación de canalizaciones o roderas, por efecto del tráfico.

Un análisis de correlación entre la energía almacenada de manera acumulativa en el pavimento (Ecuación A7), y la profundidad de la rodera reportada por Carpenter (1992), produce una buena correlación entre estas dos cantidades. Al respecto, y debido a que los resultados de la prueba AASHO reportan el deterioro del pavimento como una función de las repeticiones de carga correspondientes a ciertos tipos de eje y cargas por eje, la validación del enfoque de la energía de deformación se basó en un endurecimiento por deformación (*strain hardening*) del material asfáltico. El módulo en un momento dado, E_p , resulta entonces una función del número de repeticiones de carga:

$$E_p = E I^B \quad (A8)$$

donde E_p es el módulo de la mezcla correspondiente a I repeticiones de carga y B es una constante de calibración. Esta calibración fue llevada a cabo al establecer valores de referencia para la deformación y el número de repeticiones de carga, identificándose de esta manera el valor de la constante B . Los resultados para las diferentes cargas por eje fueron luego reproducidos con una correlación razonablemente buena ($r = 0.9$). La energía de deformación agregada es entonces calculada usando la ecuación (A7), para las diferentes cargas estáticas, al tiempo que B se mantiene constante. La energía de deformación acumulada resultante, correspondiente a las diferentes cargas estáticas, es comparada entonces con los datos de profundidad de rodera reportados por Carpenter (1992), como se muestra en la Figura A4. Los resultados muestran una razonablemente buena correlación entre la energía de deformación acumulada y la profundidad de rodera reportada, para un amplio rango de cargas estáticas y número de repeticiones de carga.

A partir de estos resultados puede inferirse que el enfoque propuesto de la energía de deformación, podría proveer una predicción razonablemente buena del deterioro del pavimento. La Figura A5 ilustra el módulo de mezcla resultante como una función de las repeticiones de carga, una vez normalizado dicho módulo con respecto al valor obtenido a cinco millones de repeticiones de carga.

A.5 Metodología de la solución

Con objeto de analizar distintas situaciones de uso de la infraestructura, los modelos descritos de la respuesta plana de los diferentes vehículos presentes en un tráfico mixto, se analizan bajo distintas condiciones de rugosidad del pavimento. Estos estados de rugosidad del pavimento implican distintos niveles de fuerza de los vehículos sobre el pavimento, de acuerdo a la Ecuación (A3). En este esquema, las ecuaciones (A4) a (A6) se resuelven con objeto de calcular la energía almacenada dentro de cada elemento del pavimento, como una función del tiempo de la duración de la carga (velocidad de desplazamiento del vehículo) y de las propiedades del pavimento y del camión. Finalmente se calcula la energía almacenada de manera agregada dentro del pavimento, con objeto de determinar la distribución espacial del daño potencial causado al pavimento por los vehículos pesados presentes en un tráfico mixto.

La integración de los modelos de pavimento y de los vehículos permite obtener un algoritmo computacional en donde las entradas consisten de los datos estadísticos de las configuraciones de los vehículos pesados, por cuanto a carga útil, cargas por eje y velocidades medias de tránsito. El algoritmo computacional comprende tres etapas: la etapa inicial involucra la lectura de los datos de entrada y la preparación de datos indirectos, tales como las velocidades individuales de los vehículos. Las respuestas dinámicas de los vehículos en el tráfico considerado y sus respectivos ejes son evaluadas en una segunda etapa, de donde las fuerzas resultantes en los ejes se aplican al modelo de energía de deformación del pavimento. La fase final del programa proporciona un archivo de resultados que comprende las características de cada vehículo por cuanto a carga útil, velocidad y tipo, así como la energía almacenada en el pavimento por efecto del paso de ese vehículo. Asimismo, el programa proporciona la energía almacenada como una función de la posición longitudinal a lo largo del perfil del pavimento.

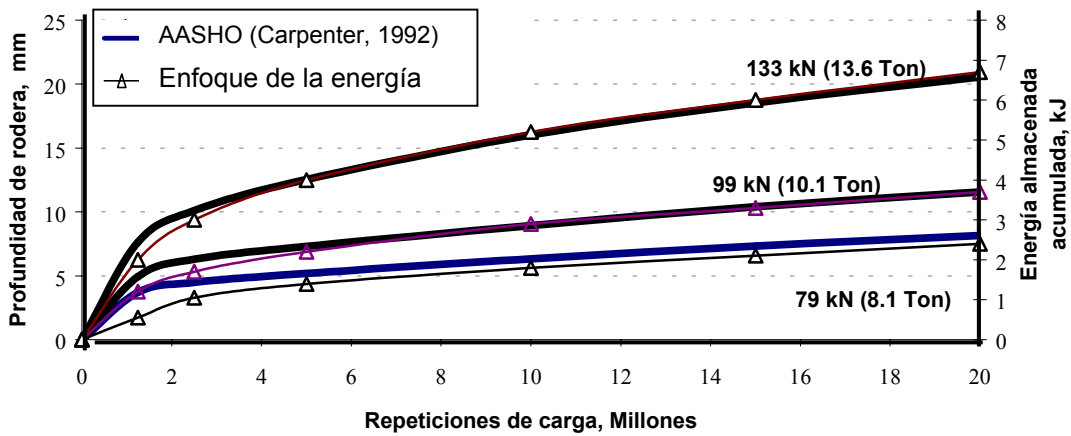


Figura A4: Comparación de los resultados obtenidos del enfoque de la energía de deformación con los resultados empíricos reportados acerca de la profundidad de la rodadura de un eje sencillo bajo diferentes niveles de carga.

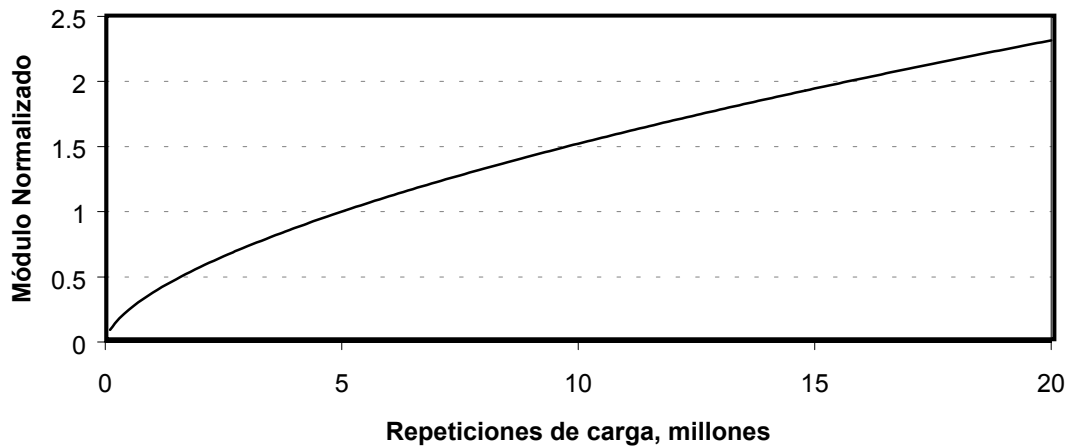


Figura A5: Módulo de la mezcla asfáltica como una función de las repeticiones de carga, normalizado con referencia al módulo a cinco millones de repeticiones de carga.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

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