

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO**

Facultad de Ingeniería

Coeficiente Integral del Daño a Pavimentos Causado por Vehículos Pesados

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en:

Sistemas de Transporte y Distribución de Carga

Presenta:

César Hurtado Mora

DIRECTOR: DR. JOSÉ ANTONIO ROMERO NAVARRETE

Querétaro, Qro. Marzo 2009



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Sistemas de Transporte y Distribución de Carga

**COEFICIENTE INTEGRAL DEL DAÑO A PAVIMENTOS
CAUSADO POR VEHÍCULOS PESADOS**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Sistemas de Transporte y Distribución de Carga

Presenta:

Ing. César Hurtado Mora

Dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

SINODALES

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Presidente

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Secretario

Dr. Ovidio González Gómez
Vocal

Dr. Alfredo Pérez García
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
18 de Marzo de 2009
México

Firma
Firma
Firma
Firma
Firma

Resumen

El deterioro del pavimento implica inversiones significantes para mantener a la infraestructura en niveles económicos y seguros. De esta forma, diferentes estudios han sido desarrollados, encaminados a la identificación de los factores más importantes que afectan el deterioro del pavimento. En este contexto, una medida de desempeño relacionada al efecto de los vehículos sobre los pavimentos ha sido desarrollada, la cual está basada en la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento y la respuesta del pavimento asociada a las cargas dinámicas. Tal metodología permite la simulación masiva del vehículo-pavimento, involucrando longitudes de caminos y volúmenes de tráfico reales, bajo diferentes condiciones ambientales. Sin embargo, otros efectos no son considerados en esta medida de desempeño, incluyendo las fuerzas tractivas existentes en la interfaz llanta-pavimento. En esta tesis tal metodología es complementada, para incluir tales fuerzas tangenciales en el análisis del efecto global de los vehículos sobre los pavimentos. El modelo resultante conduce a lo que ha sido nombrado como el Coeficiente Integral de Daño al Pavimento causado por Vehículos Pesados. Este coeficiente es definido en términos de un cierto segmento de camino a través del cual los vehículos simulados circulan, bajo condiciones reales de rugosidad del pavimento y características de los vehículos. En esta tesis dos escenarios reales de uso de caminos son considerados: uno corresponde a un tráfico medido en Francia; el otro a caminos de México. La energía almacenada dentro del pavimento es considerada. Los costos anuales de mantenimiento y rehabilitación en México son estimados en términos de cada vehículo en el tráfico medido, como una función de la carga transportada, velocidad de circulación y temperatura del pavimento. Los resultados revelan una gran dispersión del efecto potencial de los vehículos sobre los pavimentos, como una función del tipo de vehículo dentro del tráfico medido. El efecto de las fuerzas de tracción sobre el daño del pavimento y los costos de mantenimiento se manifiestan como un efecto marginal, cuando son comparados con las fuerzas verticales de las llantas. Sin embargo, tal efecto marginal, en el rango de 3%, debería ser considerado en el contexto del tráfico masivo.

(Palabras clave: interacción vehículo pesado-pavimento, daño potencial del pavimento, energía almacenada, medida de desempeño, pares de tracción, costos de mantenimiento y rehabilitación de los caminos)

Summary

Pavement deterioration implies significant investments to keep infrastructure at safe and economical levels. Different studies have been thus performed, aiming at identifying the most important factors affecting pavement deterioration. In this context, a performance measure related to vehicles effect on pavements has been developed, which is based upon vehicles response to pavement profile and pavement response to associated dynamic loads. Such methodology allows the vehicle-pavement massive simulation, involving realistic road lengths and traffic volumes, under different environmental conditions. However, other effects are not considered in this performance measure, including the tractive forces existing at the driving tires-pavement interface. In this thesis such methodology is complemented, to include such tangential forces for analysis of the overall effect of the vehicles on the pavements. The resultant model leads to what has been named as the Integral Coefficient of Pavement Damage due to Heavy Vehicles. This coefficient is defined in terms of a certain road segment through which the simulated vehicles travel, under realistic conditions of pavement roughness and vehicle characteristics. In this thesis two real road-using scenarios are considered: one corresponds to a measured traffic in France; the other to Mexico roads. The associated stored energy within the pavement is considered. Annual road maintenance and rehabilitation costs in Mexico are estimated in terms of every vehicle in the measured traffic, as a function of payload, travelling speed and pavement temperature. Results reveal a great dispersion of vehicles potential effect on pavements, as a function of vehicle type within the measured traffic. Traction forces effect on pavement damage and maintenance costs are revealed as having a marginal effect, when compared with the vertical tire forces. However, such marginal effect, in the range of 3%, should be considered in the context of massive traffic.

(Key words: heavy vehicle-pavement interaction, pavement potential damage, stored energy, performance measure, traction pairs, road maintenance and rehabilitation costs)

... a mi madre.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Dr. José Antonio Romero por su invaluable ayuda en la preparación de este trabajo al fungir como director de tesis. De igual manera agradezco al Dr. Ovidio González por sus acertados comentarios que permitieron enriquecer esta investigación. A su vez, agradezco a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en la mejora de este trabajo. También expreso mi reconocimiento al CONACYT-FOMIX-Querétaro por la financiación para el desarrollo de la presente investigación. Finalmente, agradezco todo el apoyo recibido por parte de mi familia, sin el cual no me hubiese sido posible culminar con mis estudios.

Índice

	<i>Página</i>
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Alcance de la investigación	5
1.4 Metodología	6
1.5 Generalidades	7
1.5.1 Distribución horaria del tráfico de los vehículos pesados	7
1.5.2 Daño de los pavimentos por los vehículos pesados	10
1.5.3 Rugosidad del pavimento	15
1.5.4 Respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento	18
1.5.5 Medidas de desempeño del efecto de los vehículos sobre el pavimento	20
Capítulo 2. Revisión de la literatura	22
2.1 Importancia económica de la interacción vehículo – pavimento	23
2.2 Aspectos normativos	26
2.3 Cargos por uso de la infraestructura	29
2.3.1 Esquemas de asignación de costos implementados	30
2.3.2 Esquemas de asignación de costos propuestos	31
2.4 Estudios de los aspectos físicos de la interacción vehículo pesado – pavimento	34
2.4.1 Efectos ambientales sobre el daño de los pavimentos	35
2.4.2 Propiedades de los vehículos y el daño de los pavimentos	36

2.4.3	Características de los pavimentos y su daño.....	37
2.4.4	Efecto de la velocidad de los vehículos y el daño de los pavimentos.....	38
2.4.5	Distribución espacial del daño en los pavimentos por los vehículos pesados .	39
2.4.6	Efecto de la carga transportada sobre el daño de los pavimentos.....	40
2.4.7	Efecto de los pares de tracción sobre el daño de los pavimentos	44
2.4.8	El nivel de la rugosidad en los pavimentos y la seguridad carretera	45
2.5	Comparación de las medidas de desempeño del pavimento.....	45
2.6	Discusión	47
 Capítulo 3. Simulación de la interacción vehículo – pavimento		49
3.1	Enfoque energético	50
3.1.1	Modelado de vehículos	50
3.1.2	Modelado de pavimentos	54
3.1.3	Validación del enfoque energético.....	56
3.1.4	Aplicaciones del enfoque energético	57
3.2	Efecto de los pares de tracción	57
3.2.1	Modelado de vehículos	58
3.2.2	Modelado de pavimentos	60
3.2.3	Formulación del efecto de los pares de tracción.....	61
3.2.4	Integración de la energía tangencial a la energía normal.....	64
3.3	Análisis paramétrico	66
3.3.1	Condiciones nominales de prueba	66
3.3.2	Efecto de la velocidad de circulación de los vehículos.....	67
3.3.3	Efecto de la rugosidad del pavimento.....	68
3.3.4	Efecto del nivel de carga.....	72
3.3.5	Efecto de la rigidez de las suspensiones	73
3.3.6	Efecto de los pares de tracción.....	75
3.4	Discusión	77

Capítulo 4. Coeficiente integral de daño a pavimentos por vehículos pesados	78
4.1 Formulación	79
4.2 Concepto	80
4.3 Estudios de caso.....	81
4.3.1 Aplicación para cero rugosidad del pavimento – datos del flujo vehicular medido en Francia.....	81
4.3.2 Aplicación para cero rugosidad del pavimento – datos del flujo vehicular medido en México.....	94
4.3.3 Aplicación a flujo vehicular medido en México con diferente rugosidad del pavimento.....	108
4.3.4 Comparación del efecto de flujos vehiculares medidos en México y Francia.	114
4.4 Costos de mantenimiento específicos	115
4.4.1 Costos por energía de deformación.....	116
4.4.2 Efecto de los pares de tracción.....	121
 Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	 124
5.1 Análisis del efecto de la interacción vehículo pesado – pavimento	125
5.1.1 Análisis paramétrico	125
5.1.2 Estudios de caso	126
5.1.3 Costos por energía de deformación.....	127
5.1.4 Efecto de los pares tractivos.....	127
5.2 Contribuciones y limitantes	128
5.3 Recomendaciones sobre trabajos futuros.....	128
 Bibliografía	 130

Índice de tablas

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
1-1	Propiedades normalizadas para los componentes del vehículo “cuarto de carro” (Cole y Cebon, 1994)	17
2-1	Ejemplo de una normatividad de pesos y dimensiones en México para el PBV del camión unitario (SCT, 2008).....	27
2-2	Ejemplo de una normatividad de pesos y dimensiones en México para los ejes de los vehículos pesados (SCT, 2008)	28
3-1	Condiciones y propiedades nominales para la simulación.....	66
3-2	Propiedades de rigidez de las suspensiones de los vehículos para el estudio de su efecto sobre la energía almacenada en el pavimento.....	73
4-1	Datos capturados por el sistema de monitoreo del LCPC	82
4-2	Velocidades y pesos máximos autorizados para los camiones más comúnmente empleados en Francia	82

Índice de figuras

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1-1	Distribución porcentual de los tipos de vehículos pesados más comunes encuestadas en las 10 estaciones de aforo (con datos de Mendoza <i>et al.</i> , 1992).....	8
1-2	Distribución porcentual horaria del flujo vehicular registrado en las 10 estaciones de aforo (con datos de Mendoza <i>et al.</i> , 1992)	9
1-3	Estructura típica de un pavimento flexible (Arriaga y Garnica, 1998).	11
1-4	Tipos de deterioro en pavimentos asfálticos por deformación plástica: (a) deformaciones longitudinales (Molenaar, 2007), y (b) deformaciones transversales (CDCII, 2002)	13
1-5	Deterioro de pavimentos flexibles por falla por fatiga (Molenaar, 2007).....	14
1-6	Representación gráfica del modelo de vehículo lineal “cuarto de carro” (Romero, 1996).....	16
1-7	Escala de valores del IIR y las características de los pavimentos (Aguerreberre y Cepeda, 1991).....	17
1-8	Simulación de la variación en el espacio de las cargas del eje delantero de un vehículo tipo C2 sobre el pavimento (Quijada-García, 2005).....	19
2-1	Costo del daño de pavimento/Ton-km para cinco tipos de vehículos pesados (con datos de Mendoza y Gutiérrez, 1994)	25
2-2	Efecto de la temperatura sobre la deformación de una muestra de asfalto (con información de Kim <i>et al.</i> , 2005)	36
2-3	Suspensión de “viga viajera” o “ <i>walking beam</i> ”	37

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
2-4 Efecto de la rugosidad y de la velocidad sobre el daño potencial de los pavimentos (Romero <i>et al.</i> (2009), con datos de Fekpe (2006))	38
2-5 Efecto de la rugosidad del pavimento sobre la fatiga potencial del pavimento (Romero <i>et al.</i> (2009), con datos de Gillespie <i>et al.</i> (1993)).....	38
2-6 Variación simulada del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento como una función de la velocidad (vehículo clase autobús, IIR = 0.94 mm/m) (Romero <i>et al.</i> (2009), con datos de Fekpe (2006)).....	39
2-7 Efecto del tipo de carga sobre el daño potencial de los pavimentos (Romero <i>et al.</i> , 2007).....	42
2-8 Vista de la aproximación a la estación de pesaje de Calamanda, sobre la carretera 57 México-Querétaro	43
2-9 Sensor hidrostático ensayado en México (Romero y Lozano, 2008).....	44
3-1 Vehículos considerados en la simulación de la interacción vehículo pesado-pavimento (Romero y Lozano, 2006).....	51
3-2 Modelos discretos compuestos de masas rígidas acopladas por elementos flexibles y amortiguadores carentes de masa, correspondientes a los vehículos tipo: (a) C2; (b) C3; (c) T3-S2; y (d) T3-S3 (Romero 2000).....	52
3-3 Modelo discreto de elementos asfálticos no acoplados del pavimento (Romero y Lozano, 2006).....	55
3-4 Suma de energías almacenadas transitoriamente en el pavimento para el paso de ejes sencillos, comparadas con los resultados empíricos obtenidos de la “Prueba AASHO” bajo diferentes niveles de carga (Romero, 2000)	57
3-5 Sistema de tracción correspondiente a un vehículo tipo C2 (Wideberg, 2007)	58

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
3-6 Fuerzas de tracción (F_m) y de resistencia al desplazamiento (F_{rr} : resistencia a la rodadura; y F_v : resistencia por arrastre del aire).....	59
3-7 Modelo discreto de los elementos asfálticos no acoplados del pavimento, al que se le incorpora la fuerza de tracción motriz de las llantas (adaptado de Romero y Lozano, 2006).....	60
3-8 Deformaciones normales δ y tangenciales γ del elemento de asfalto.....	60
3-9 Esquema de la simulación del paso de los vehículos pesados sobre el pavimento ...	65
3-10 Efecto de la velocidad sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales).....	67
3-11 Algunos perfiles empleados en la simulación del efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada (primera parte) (DOT, 2006)..	68
3-12 Algunos perfiles empleados en la simulación del efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada (segunda parte) (DOT, 2006).	69
3-13 Efecto del nivel de rugosidad (IIR) sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales, pero a 40 km/h)	71
3-14 Peso normalizado de los vehículos a plena carga.....	72
3-15 Efecto del nivel de carga (en porcentaje sobre la carga máxima permitida) sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales)	72
3-16 Efecto de la rigidez de la suspensión sobre la energía almacenada, en función del tipo de vehículo y de la rugosidad del camino	74
3-17 Efecto del par de tracción sobre la energía almacenada en el pavimento (condiciones nominales).....	76

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
4-1 Vehículo tipo T2-S3, el más empleado en Francia	83
4-2 Dispersión de valores del PBV de los vehículos tipo T2-S3 medidos en Francia por el LCPC	84
4-3 Variación de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo T2-S3 medida en Francia por el LCPC	85
4-4 Dispersión de la velocidad de los vehículos tipo T2-S3 medida en Francia por el LCPC	86
4-5 Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T2-S3	86
4-6 Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T2-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades	87
4-7 Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C2 medidos en Francia por el LCPC.....	88
4-8 Variación de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo C2 medida en Francia por el LCPC.....	89
4-9 Dispersión de la velocidad de los vehículos tipo C2 medida en Francia por el LCPC	90
4-10 Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C2.....	91
4-11 Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2, normalizada al valor promedio de estas propiedades	91
4-12 Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2 y T2-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades.....	92

<i>Figura</i>	<i>Página</i>	
4-13	Dispersiones de la energía específica almacenada en el pavimento por cada Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos tipo: (a) T2-S3 y (b) C2.....	93
4-14	Distribución horaria del tráfico medido en México (con datos de Gutiérrez <i>et al.</i> , 1999).....	95
4-15	Características de dispersión horaria del tráfico medido en México.....	96
4-16	Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C2 medidos en México por el IMT	97
4-17	Variación simulada de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo C2	97
4-18	Dispersión simulada de la velocidad de los vehículos tipo C2	98
4-19	Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C2.....	98
4-20	Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2, normalizada al valor promedio de estas propiedades	99
4-21	Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C3 medidos en México por el IMT	100
4-22	Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C3.....	101
4-23	Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C3, normalizada al valor promedio de estas propiedades	101
4-24	Dispersión en los valores del PBV de los vehículos tipo T3-S2 medidos en México por el IMT	102

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
4-25	Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T3-S2 103
4-26	Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T3-S2, normalizada al valor promedio de estas propiedades 103
4-27	Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo T3-S2 medidos en México por el IMT 104
4-28	Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T3-S3 105
4-29	Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T3-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades 105
4-30	Dispersiones de la energía específica almacenada en el pavimento por cada Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos tipo: (a) C2, (b) C3, (c) T3-S2 y (d) T3-S3 106
4-31	Energía almacenada promedio por Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos 108
4-32	Efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada, como una función del tipo de vehículo 109
4-33	Dispersión de la energía almacenada en el pavimento en términos de los valores máximos y mínimos obtenidos, como una función de la rugosidad y del tipo de vehículo 111
4-34	Efecto de la rugosidad sobre los valores máximos y mínimos de la energía almacenada en el pavimento 112
4-35	Dispersión de las energías almacenadas en el pavimento como una función del tipo de vehículo y de la rugosidad del pavimento 113

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
4-36 Valores máximos de los cocientes de máximas energías entre mínimas energías almacenadas en el pavimento	114
4-37 Relaciones promedio de energía entre PBV, para los vehículos en el tráfico medido en Francia	114
4-38 Dispersión en los costos atribuibles a cada vehículo en el tráfico medido: (a) vehículos tipo C2, (b) vehículos tipo C3, (c) vehículos tipo T3-S2 y (d) vehículos tipo T3-S3.....	117
4-39 Costos en Pesos Mexicanos máximos y mínimos que se asocian a cada tipo de vehículo dentro del tránsito	119
4-40 Relaciones entre los valores máximos y mínimos por tipo de vehículo	120
4-41 Costos promedio en Pesos Mexicanos que se asocian a cada tipo de vehículo dentro del tránsito, comparado con las tarifas vigentes en la Caseta Tepetzotlán de la carretera México-Querétaro.....	120
4-42 Monto total por día atribuible al daño del pavimento producto del paso de vehículos pesados en el tramo carretero de la Caseta Tepetzotlán	122
4-43 Monto total por día atribuible al daño del pavimento producto del efecto de los pares de tracción por el paso de vehículos pesados en el tramo carretero de la Caseta Tepetzotlán	123

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo, se describen los elementos para situar a esta tesis en el contexto de las investigaciones llevadas a cabo en torno a la interacción vehículo pesado-pavimento. Esta descripción busca justificar el desarrollo del trabajo aquí presentado, en términos de las herramientas de análisis necesarias para evaluar el efecto de tal interacción. Se plantean asimismo los objetivos y alcances de la investigación, además de incluir la descripción de la metodología a seguir.

Con objeto de facilitar la comprensión de la tesis, en este capítulo se tratan algunas generalidades relacionadas con el efecto de los vehículos pesados sobre el pavimento. De esta forma, primeramente se analiza la distribución horaria del tráfico medida en los principales corredores troncales de México. Esto con el fin de observar las variaciones más importantes en cuanto a las condiciones de operación de los vehículos, así como las circunstancias en las que hacen uso de las infraestructuras. Posteriormente, se revisan los aspectos generales en torno al daño que sufren los pavimentos por efecto de los vehículos pesados, caracterizándolos en fatiga y en deformación plástica. En seguida se define la rugosidad de los pavimentos, la cual corresponde a la propiedad más importante que altera los niveles de vibración de los vehículos y, por lo tanto, las fuerzas dinámicas de los vehículos sobre tales infraestructuras. Esta respuesta dinámica de los pavimentos se describe en términos de la vibración de los componentes que conforman a los vehículos y de las condiciones de operación. Finalmente, se presenta una introducción a los modelos del comportamiento de la interacción vehículo pesado-pavimento (mejor conocidos como medidas de desempeño en la literatura especializada de los pavimentos), los cuales son desarrollados para predecir el desempeño de los pavimentos ante ciertas condiciones.

1.1 Antecedentes

Las investigaciones en torno a la interacción de los vehículos pesados con el pavimento, han representado diferentes niveles de interés a lo largo de la historia de los caminos (Lay, 2008; Cebon, 1999). La motivación fundamental para el desarrollo de tales investigaciones, se ha derivado de las consecuencias negativas que tiene el daño de los pavimentos sobre diferentes aspectos del transporte de mercancías y personas, los cuales incluyen aspectos económicos, de seguridad y de confort (Harwood *et al.*, 2003; Sweatman, 1983).

De esta forma, la economía de las naciones es influenciada por el estado de sus vías de comunicación terrestre, por lo que los gobiernos de los diferentes países emplean porciones importantes de sus presupuestos para reparar y mantener a los pavimentos en condiciones económicas de uso. Esto se debe a que un pavimento dañado, caracterizado por contener baches y otros tipos de irregularidades, implica mayores costos de operación para los usuarios de las infraestructuras, los cuales van desde montos asociados al deterioro de los componentes del vehículo hasta aquellos que son producto del daño de las mercancías transportadas.

Es importante señalar que el nivel de daño en los pavimentos, también influye en la eficiencia energética de los camiones, debido a que un pavimento de perfil irregular representa una mayor resistencia al movimiento. Al respecto, algunos autores reportan incrementos de 100% en la resistencia a la rodadura de los vehículos, al pasar de un pavimento en buen estado a otro en malas condiciones (Rakha *et al.*, 2001). Otras externalidades producto de los pavimentos en mal estado, se relacionan con las vibraciones de los ocupantes de los vehículos, ya que este efecto tiende a cansar más rápidamente a los conductores, lo que afecta de manera sensible la seguridad de operación (Foster *et al.*, 2001).

En la perspectiva de los aspectos asociados con el daño de los pavimentos producto del paso de los vehículos pesados, ha sido realizado un gran número de investigaciones, a través de enfoques tanto teóricos como experimentales. Los objetivos particulares de tales investigaciones, han consistido en la identificación de los elementos y factores que de manera más importante afectan a la interacción, manifestada por el daño de los pavimentos (OECD, 1998; Cebon, 1993; Gillespie *et al.*, 1993; Woodrooffe *et al.*, 1988; Sweatman, 1983).

En este contexto, ha sido de particular interés el análisis que las condiciones de operación de los equipos y la rugosidad del pavimento pudieran tener sobre el daño de éste, así como la influencia de aspectos ambientales tales como la temperatura (Hildebrand, 2003; Archilla y Madanat, 2000; Liu, 1999; Collop y Cebon, 1995; Collop, 1993).

Mientras que las fuerzas que los vehículos aplican a los pavimentos son la principal causa del daño de éstos, tales fuerzas están compuestas por una parte estática y otra dinámica, como una función de la vibración de las diferentes masas de los vehículos. Esta situación conforma una interacción complicada, al depender dichas fuerzas de las condiciones de operación de los vehículos y de otros factores, tales como las propiedades de rigidez de las llantas y de las suspensiones.

Aunque normalmente se desprecia este efecto, la rigidez del pavimento afecta la forma en que las masas de los vehículos vibran y, por lo tanto, las fuerzas que tales equipos ejercen sobre el pavimento. De esta manera, las características del pavimento que son consideradas de forma general como influyentes en el comportamiento o desempeño a largo plazo de estas infraestructuras, incluyen el contenido de huecos, la temperatura, el índice de penetración y la rugosidad del pavimento (Collop, 1993).

Las cargas dinámicas de los vehículos sobre el pavimento, derivadas de la vibración de los vehículos por el perfil del pavimento - se sabe ahora - implican una distribución espacial irregular del daño de los pavimentos, por lo que existirán partes del pavimento que sufrirán un mayor daño con relación a otras, al considerar un mismo tramo de camino (Romero y Lozano, 2006).

Como se describirá en las siguientes secciones, el mecanismo de falla del pavimento es el de fatiga. Esto es, la falla se hace evidente después de un número de aplicaciones de carga (Rico y Del Castillo, 1989). Esta falla puede consistir de una fractura progresiva o de una deformación plástica, también progresiva.

Para efecto de contener el efecto nocivo de los vehículos pesados sobre los pavimentos, los gobiernos y administradores de las carreteras han optado por regular el peso máximo permitido para el uso de las infraestructuras, tanto con relación al peso completo de los vehículos como con el peso por eje (Straus y Semmens, 2006).

Adicionalmente a las regulaciones del peso estático de los vehículos, se han propuesto diversas medidas de desempeño para evaluar el efecto que tienen, tanto los diseños de los vehículos como sus condiciones de operación, sobre el daño de los pavimentos (Hussain y Parker, 2006; Gillespie *et al.*, 1993). Sin embargo, tales medidas se relacionan inicialmente con las fuerzas dinámicas de los vehículos y no toman en cuenta la respuesta dinámica potencial de los pavimentos. No obstante, es importante considerar la respuesta de los pavimentos, en especial de aquellos hechos de asfalto, debido a que éstos exhiben diferentes niveles de vulnerabilidad como una función de la velocidad de aplicación de las cargas y de la temperatura (Collop, 1993).

Por otro lado, las metodologías reportadas para evaluar el efecto dañino potencial de los vehículos sobre el pavimento que contemplan la respuesta de éste, sin embargo, están basadas en métodos extremadamente complicados, lo que dificulta la aplicación de tales aproximaciones en el estudio general del efecto de los vehículos sobre los pavimentos.

No obstante, se pueden identificar algunos indicios de que se requieren aproximaciones novedosas para estudiar el efecto de los vehículos sobre los pavimentos, al observar la ambigüedad reportada en cuanto a ciertos aspectos de la interacción. Al respecto, al considerar la relación entre la velocidad de los vehículos y el daño de los pavimentos, algunas investigaciones de campo reportan una disminución rápida en los niveles de esfuerzo al incrementar la velocidad de circulación (Luskin y Walton, 2001; Chatti *et al.*, 1996). Sin embargo, lo opuesto también ha sido sugerido (Lin *et al.*, 1994). De manera complementaria, se ha reportado que el daño de los pavimentos disminuye con el incremento de la velocidad, siempre y cuando los niveles de irregularidades presentes en el pavimento sean bajos (Karamihas y Gillespie, 1994).

La falta de una medida de desempeño válida y simple para caracterizar el efecto potencial nocivo de los vehículos sobre el pavimento, por ejemplo, hace imposible crear un sistema de peajes justo en las carreteras de cuota, bajo el cual pudieran aplicarse cargos a los usuarios como una función del daño causado a los pavimentos (Romero *et al.*, 2006; Boilé *et al.*, 2003; Wachs, 2003).

Se requiere destacar que alrededor de la interacción de los vehículos pesados con los pavimentos, ocurren importantes inversiones. Mientras que en México se invirtieron hasta 15 mil millones de pesos en 2008 para mantenimiento y conservación de los pavimentos, la cifra correspondiente para los Estados Unidos

de América (EUA) en el año 2002 fue de 35.8 mil millones de dólares (US-DOT, 2004). En esta perspectiva, es justificable cualquier esfuerzo por disminuir estos importantes montos, tan sólo en un pequeño porcentaje.

1.2 Objetivos

El objetivo de esta tesis es desarrollar una medida de desempeño para calificar el efecto potencial de los vehículos sobre los pavimentos flexibles, la cual toma en cuenta la respuesta dinámica tanto de los vehículos al perfil del pavimento, como la del pavimento a las fuerzas de los vehículos.

La medida de desempeño propuesta, se denomina Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos Flexibles por Vehículos Pesados. Se nombra integral debido a que toma en cuenta tanto las fuerzas verticales que los vehículos ejercen sobre el pavimento en la interfaz llanta-pavimento, como las fuerzas tangenciales resultantes, asociadas a los pares de tracción de los ejes motrices de los vehículos.

Una de las características buscadas en esta medida de desempeño, consiste en la posibilidad de efectuar estudios masivos de la interacción vehículo pesado-pavimento, además de permitir el empleo tanto de flujos vehiculares realistas como de pavimentos de longitud también real.

1.3 Alcance de la investigación

En esta tesis, se parte de una revisión de la literatura en cuanto a aquellas medidas de desempeño del pavimento que han sido propuestas para la evaluación del efecto potencial de los vehículos. Esta revisión incluye una crítica constructiva, en la perspectiva de la necesidad de contar con un modelo objetivo para caracterizar el efecto potencial asociado a la interacción vehículo pesado-pavimento.

De esta revisión se propone una medida de desempeño del pavimento, la cual se basa en otro modelo existente, validado y reportado previamente en la literatura. De esta forma, dicho modelo es actualizado y

ampliado para tomar en cuenta otros factores asociados a la interacción vehículo pesado-pavimento. En particular, se incluye el efecto de los pares de tracción de los ejes motrices de los vehículos pesados.

Posteriormente, la medida propuesta se utiliza en la simulación de un flujo vehicular realista medido en México, con el objeto de analizar el efecto potencial de los vehículos pesados sobre el pavimento. Adicionalmente, con el propósito de poner dentro del contexto internacional la situación presente en México en cuanto al uso de las infraestructuras carreteras por parte de los vehículos pesados, la medida de desempeño desarrollada se aplica a un tráfico vehicular medido en el extranjero.

Finalmente, al efecto potencial de la interacción vehículo pesado-pavimento obtenido de las simulaciones, se le asignan los montos de las inversiones efectuadas para mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera en México. Esto con el objeto de establecer el monto atribuible al uso que los vehículos pesados hacen de los caminos, en función del daño que ocasionan al pavimento. Posteriormente, este monto es comparado con aquellas tarifas vigentes aplicadas en un tramo carretero de cuota típico de México y se calculan los montos asociados al efecto de los pares de tracción de los ejes motrices.

1.4 Metodología

La secuencia del desarrollo de esta tesis, combina el método científico con el de Diseño en Ingeniería, cuyo paralelismo se ha reconocido en diferentes ocasiones (Dieter, 1986).

De esta forma, se parte de un conjunto de necesidades de investigación y se plantean una serie de hipótesis, que dan pie al desarrollo del concepto para satisfacer tales necesidades. Al respecto, se considera que los elementos de validación de la medida de desempeño del pavimento reportada en la literatura y modificada en esta tesis, son extensibles al incorporar el efecto de los pares de tracción de los ejes de los vehículos pesados.

Se emplean modelos de vehículos y de pavimentos para estudiar el efecto que tendría un tráfico medido sobre las infraestructuras. Se realizan diversos análisis paramétricos para comprobar la aplicabilidad del esquema propuesto en el estudio del efecto de los vehículos pesados sobre el pavimento.

1.5 Generalidades

Se revisan diferentes aspectos relacionados con los pavimentos y los vehículos, los cuales serán de utilidad en la discusión de la metodología propuesta en esta tesis para evaluar el efecto de los vehículos pesados sobre los pavimentos.

1.5.1 Distribución horaria del tráfico de los vehículos pesados

El primer estudio desarrollado a nivel nacional para obtener datos sobre los vehículos pesados que circulan en México, fue emprendido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 1991 y se denominó “Estudio de Pesos y Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por las Carreteras Mexicanas” (Mendoza *et al.*, 1992). Este estudio tuvo por objeto recolectar información tanto de la carga transportada como de las características de los vehículos pesados empleados. Debido a la utilidad e importancia de los datos obtenidos, el estudio ha alcanzado el carácter de permanente, por lo que se realiza cada año y ha contado con un número máximo de 27 estaciones colectoras de datos en el año de 1994 (Gutiérrez *et al.*, 2006).

Para el primer año en que se realizó este estudio (1991), la información fue obtenida a través de 10 estaciones de aforo, instaladas sobre los principales corredores troncales de la red nacional por un periodo de cuatro días. Cada una de estas estaciones obtuvo datos sobre los vehículos pesados referentes a: (i) las características de la carga transportada que incluye tipo, origen y destino; (ii) el número de vehículos pesados registrados; (iii) las dimensiones generales de los vehículos registrados en cuanto al largo, ancho y alto; y (iv) el peso del vehículo que incluye tanto el Peso Vehicular Bruto (PVB) como el peso por eje. Las encuestas fueron realizadas sin incluir los fines de semana, con el objeto de evitar cualquier sesgo en los datos recopilados que pudiera ocasionar su consideración (Mendoza *et al.*, 1992).

Las clases de vehículos identificadas en el tráfico medido, fueron vehículos unitarios o no articulados y articulados. Los vehículos unitarios se denominan C2 cuando tienen dos ejes y C3 cuando tienen tres ejes. En cuanto a los vehículos articulados, T3-S2 significa un tractor con tres ejes y un semirremolque con dos ejes, mientras que el vehículo T3-S3 representa un tractor con tres ejes y semirremolque de tres ejes (SCT, 2008). La Figura 1-1 ilustra la composición en porcentaje de estos cuatro tipos de vehículos, en cada una

de las estaciones de aforo instaladas. De esta figura se puede observar de forma general que los porcentajes son relativamente similares entre las distintas estaciones. A su vez, queda de manifiesto que la mayor frecuencia de los vehículos registrados corresponde al vehículo tipo C2, seguido por los vehículos articulados T3-S2 y T3-S3. De forma particular, los porcentajes son como sigue: (i) vehículos unitarios C2, con 35% y un PBV promedio de 9 Ton; (ii) vehículos unitarios C3, con 22% y un PBV promedio de 16 Ton; (iii) vehículos articulados T3-S2, con 24% y un PBV promedio de 30 Ton; y (iv) vehículos articulados T3-S3, con 15% y un PBV promedio de 39 Ton (Mendoza *et al.*, 1992).

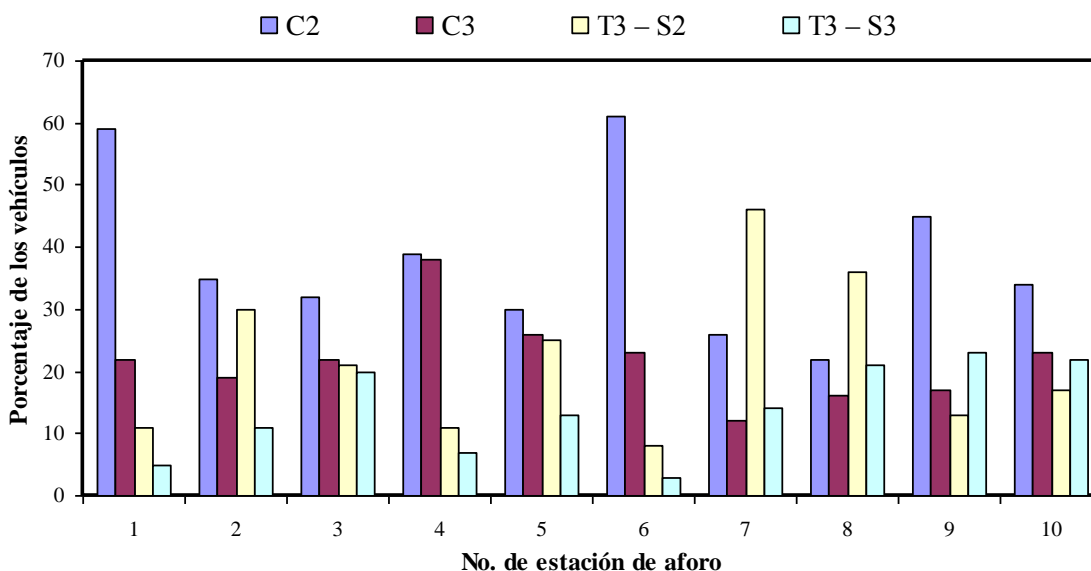


Figura 1-1: Distribución porcentual de los tipos de vehículos pesados más comunes encuestadas en las 10 estaciones de aforo (con datos de Mendoza *et al.*, 1992).

En lo que se refiere a la distribución horaria de los vehículos registrados, la Figura 1-2 muestra la distribución porcentual horaria del flujo de vehículos pesados (con relación al flujo diario total) registrada en las 10 estaciones de aforo instaladas durante el periodo de cuatro días que duró la encuesta.

De acuerdo con los datos de la Figura 1-2, es posible identificar el lapso en el cual se concentró la mayor cantidad de flujo de vehículos. Dicho periodo de mayor afluencia, queda comprendido entre las 6 y las 22 horas, en el cual se registró aproximadamente 76% del total de vehículos encuestados. Asimismo, en esta figura se evidencian los dos principales periodos “pico”, los cuales representan 38.4% del flujo vehicular. Tales periodos, corresponden a los intervalos de tiempo comprendidos entre las 12 – 13 horas y 15 – 20

horas. En forma aproximada, la diferencia entre los periodos que presentaron más actividad respecto a los que presentaron menos circulación, está del orden de 2 a 1.

Con base en esta información, se describen las siguientes observaciones generales en cuanto a la distribución del tráfico de vehículos pesados a través del día:

- Los periodos “pico” se registran particularmente en el periodo de tiempo comprendido entre las horas de la tarde; y
- La existencia de tales periodos “pico”, implica la tendencia por parte de la infraestructura carretera a operar hacia el límite de su capacidad.

Estos dos aspectos tienen profundas repercusiones en cuanto al desempeño de los pavimentos flexibles, como se discutirá en el siguiente punto. Lo anterior sin tomar en cuenta los efectos negativos producto de los niveles de congestionamiento.

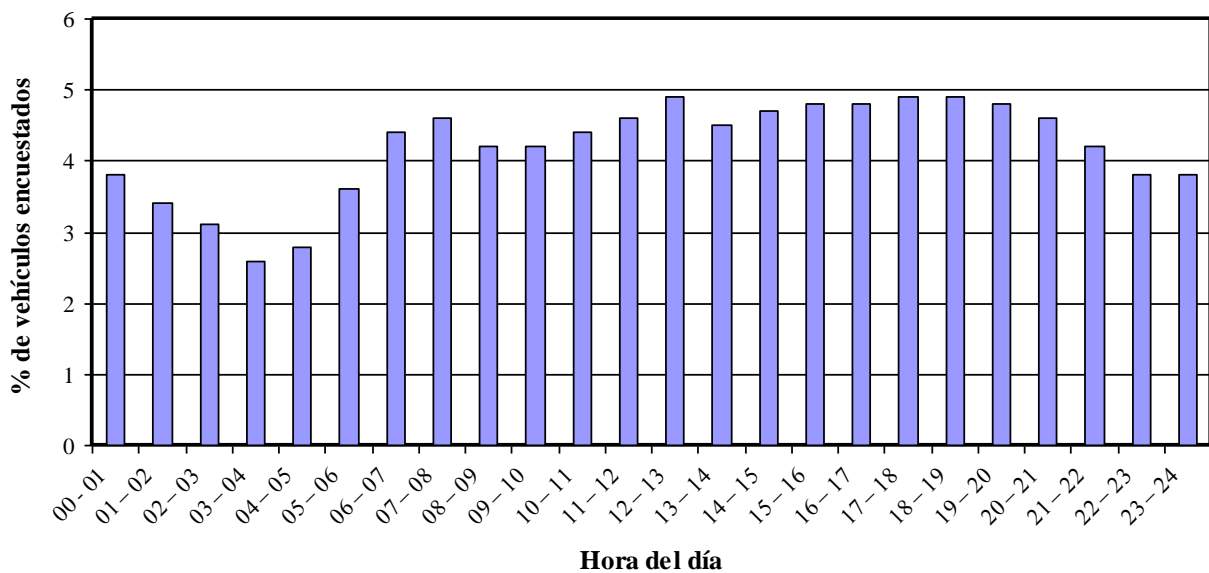


Figura 1-2: Distribución porcentual horaria del flujo vehicular registrado en las 10 estaciones de aforo (con datos de Mendoza *et al.*, 1992).

1.5.2 Daño de los pavimentos por los vehículos pesados

De forma general, el concepto de pavimento se refiere al conjunto de elementos estructurales que dan sustento a una superficie de rodamiento, es decir, son todas aquellas capas que conforman a un pavimento y que en su conjunto se les denomina sección estructural (Haas *et al.*, 1993).

Los pavimentos pueden ser clasificados en tres tipos: (i) pavimentos flexibles, que consisten de una carpeta de concreto asfáltico en su superficie, la cual se encuentra apoyada sobre una serie de capas de material granular; (ii) pavimentos rígidos, los cuales son construidos por losas de concreto hidráulico; y (iii) pavimentos compuestos, que combinan en su estructura superior una capa de material asfáltico sobre otra de concreto hidráulico (Luo, 2005; Ongel y Harvey, 2004). Dentro de estos tres tipos, los pavimentos flexibles son altamente vulnerables a sufrir daño en la medida en que disminuye la velocidad de aplicación de la carga de los vehículos e incrementa la temperatura del pavimento (Romero *et al.*, 2009; Romero y Lozano, 2006; Kim *et al.*, 2005; Arriaga y Garnica, 1998).

A este respecto, al considerar la distribución horaria descrita en el punto anterior, se presentaría el escenario menos adecuado en lo que se refiere a la utilización de los pavimentos asfálticos por parte del tráfico de vehículos pesados medido en México, como consecuencia del efecto combinado extremo de la aplicación de la carga y la temperatura. Esto debido a que las infraestructuras registran periodos de máxima ocupación, lo que implica un mayor riesgo de congestionamiento vehicular y por consiguiente un incremento en el tiempo de aplicación de la carga. Además, esta condición se presenta en el momento en que el pavimento es más vulnerable a sufrir daño, es decir, en el lapso de tiempo comprendido entre las horas del día, dentro del cual la radiación solar es más intensa y, por lo tanto, la temperatura del pavimento es alta. Estos aspectos en torno al desempeño de los pavimentos flexibles ante la aplicación de cargas y temperatura, serán discutidos en el Capítulo 2 de esta tesis.

1.5.2.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles están conformados por una serie de capas que típicamente se les denomina: (i) carpeta asfáltica, (ii) base hidráulica, (iii) subbase, (iv) subbrasante, y (v) cuerpo del terraplén, las cuales

en su conjunto se les denomina sección estructural (Arriaga y Garnica, 1998). En la Figura 1-3, se muestra la disposición del conjunto de capas correspondiente para este tipo de pavimento.



Figura 1-3: Estructura típica de un pavimento flexible (Arriaga y Garnica, 1998).

La sección estructural está constituida por materiales con propiedades de resistencia y deformabilidad decrecientes, debido a que los esfuerzos ejercidos desde la superficie disminuyen a medida que la profundidad aumenta (Arriaga y Garnica, 1998). Por esta razón, la carpeta asfáltica corresponde a la capa más rígida, al considerar la sección estructural (Rico *et al.*, 1998A). Además, al encontrarse en la parte superior, la carpeta asfáltica (o capa de rodamiento) soporta directamente tanto los esfuerzos producto de las sollicitaciones del tráfico de vehículos, como los factores climáticos (radiación solar, precipitaciones pluviales, nieve y hielo-deshielo). Esto provoca que la carpeta asfáltica sea la que mayormente esté expuesta a sufrir daño al considerar el conjunto de capas.

1.5.2.2 Deterioros en los pavimentos flexibles

El daño de los pavimentos involucra una gran cantidad de factores, que afectan en mayor o menor medida el desempeño de estas infraestructuras. Dentro de estos factores, se pueden mencionar los siguientes: (i) propiedades del pavimento, (ii) sollicitaciones del tráfico, y (iii) condiciones ambientales (Cebon, 1993). La combinación de estos distintos factores, ocasiona un número variado de deterioros, aunque el mecanismo de falla del pavimento aún se discute (Hong y Prozzi, 2006).

En lo que se refiere a la magnitud del daño de caminos, la literatura especializada en pavimentos orienta el ordenamiento de los deterioros en función de sus causas y orígenes (CDCII, 2002). A este respecto, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) publicó el “Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas” (IMT, 1991). Los deterioros considerados, corresponden a aquellas fallas que comúnmente se han presentado a lo largo de la vida de servicio de las carreteras de la red nacional

mexicana. Adicionalmente, esta información se complementa con un porcentaje de los deterioros reportados en catálogos de otros países.

El catálogo del IMT clasifica los deterioros en cuatro categorías, con base en el fenómeno preponderante en: (i) desprendimientos, (ii) deformaciones, (iii) roturas, y (iv) varios (IMT, 1991). De este conjunto de deterioros, los que se presentan con mayor frecuencia corresponden a los tres primeros, es decir, los desprendimientos, las deformaciones y las roturas (Molenaar, 2007). No obstante, el efecto de la acción de las cargas repetidas sobre los pavimentos es la causa de daño más importante, la cual se manifiesta principalmente como: (i) deformaciones, o formación de “roderas”; y (ii) roturas, también denominadas fatiga del pavimento o “calabereos” (Garnica y Correa, 2004; Kitching *et al.*, 1998; Rico *et al.*, 1998A; Cebon, 1993; Thompson y Nauman, 1993).

En los siguientes puntos, se describen de forma general estos dos tipos de deterioro.

1.5.2.3 Deformación plástica o formación de “roderas”

La deformación plástica en los pavimentos asfálticos, se deriva del flujo de los materiales aglutinantes de la mezcla asfáltica, como resultado de las sollicitaciones del tráfico de vehículos y aunado a los factores ambientales (temperatura), los cuales se pueden combinar con fallas en la preparación de la mezcla asfáltica en cuanto a los porcentajes empleados de tales aglutinantes asfálticos.

Este tipo de deterioro se puede dividir de acuerdo a su orientación en: (i) deformaciones longitudinales, que se presentan como canalizaciones en el sentido paralelo al eje del camino; y (ii) deformaciones transversales, que corresponden a ondulaciones en el sentido perpendicular al eje del camino (Molenaar, 2007). La Figura 1-4 ilustra estos dos tipos de deterioro, seguida por la descripción de algunos de los aspectos más relevantes en cuanto a la causalidad de cada una de estas formas de deformación permanente.



(a) Roderas longitudinales



(b) Roderas transversales

Figura 1-4: Tipos de deterioro en pavimentos asfálticos por deformación plástica: (a) deformaciones longitudinales (Molennar, 2007), y (b) deformaciones transversales (CDCII, 2002).

Deformaciones longitudinales: Cuando la llanta de un vehículo ejerce una fuerza sobre el pavimento se producen esfuerzos normales y cortantes, que ocasionan una deformación en el área que soporta la carga, la cual recupera su condición inicial sólo de forma parcial una vez que la acción es retirada (Garnica y Correa, 2004; Rico *et al.*, 1998A). De esta forma, ante cargas repetitivas, el efecto de la deformación permanente es acumulativo, la cual produce una compactación y fluencia del material que se encuentra debajo de las rodadas de las llantas de los vehículos, por lo que se forman cordones laterales en cada uno de los extremos de la ranura o canalización así creada, a la cual se le denomina comúnmente como “rodera” (Kim *et al.*, 2005; Garnica y Correa, 2004; Arriaga y Garnica, 1998; Collop, 1993).

Deformaciones transversales: Estas se presentan en forma de crestas y valles regularmente espaciados en distancias cortas a lo largo del perfil del pavimento (CDCII, 2002; IMT, 1991). Este tipo de deterioro está asociado principalmente a las fuerzas tangenciales producto de la aceleración y el frenado de los vehículos pesados, por lo que se presenta con mayor frecuencia en las intersecciones de los caminos (De Solminihac, 2001; Arriaga y Garnica, 1998; IMT, 1991).

Además de los deterioros mencionados, la deformación permanente contribuye a la ruptura y agrietamiento de la carpeta asfáltica, lo que produce la falla por fatiga (Rico *et al.*, 1998A).

1.5.2.4 Falla por fatiga

La falla por fatiga es la que ocurre por la acción reiterada de un esfuerzo, es decir, el efecto repetitivo que tiene el tránsito sobre la carpeta asfáltica (Rico *et al.*, 1998A). En el ámbito de la mecánica de materiales, se le denomina también fractura progresiva (Juvinal, 1986).

El efecto acumulativo y perjudicial de las cargas repetidas, depende fundamentalmente de la magnitud del esfuerzo al ser aplicado y de la magnitud de la deformación inducida en cada ciclo de aplicación de la carga (Rico *et al.*, 1998A). Este deterioro se presenta como un conjunto de grietas en la carpeta asfáltica, llamadas comúnmente “piel de cocodrilo”. La Figura 1-5 muestra algunos casos típicos de falla por fatiga que se pueden presentar en los tramos carreteros (Molenaar, 2007). Si bien, los pavimentos ilustrados corresponden a caminos secundarios, el fenómeno de fatiga puede ocurrir incluso en carreteras de altas especificaciones.

Es importante mencionar que la falla por fatiga de los pavimentos, puede ser influenciada de manera importante por la capacidad estructural de las capas inferiores de la sección estructural, aunado a las condiciones de drenaje del mismo. Esto es, una subbase “débil” ocasionará una fatiga acelerada de la carpeta asfáltica (Rico y Del Castillo, 1998).



(a) Fatiga con desprendimiento o fractura



(b) Fatiga con “calabereo” o “piel de cocodrilo”

Figura 1-5: Deterioro de pavimentos flexibles por falla por fatiga (Molenaar, 2007).

1.5.3 Rugosidad del pavimento

De forma general, por daño del pavimento se entiende como el conjunto de “manifestaciones” presentes en su estructura y que afectan el confort, seguridad y costos de operación de los vehículos (De Solminihaç, 2001). Las “manifestaciones” más importantes que sufre un pavimento, son expresadas a través de la rugosidad de su superficie (Gillespie *et al.*, 1993). Si bien, en la literatura se puede encontrar más de una descripción para la rugosidad del camino, Sayers y Karamihas (1998) citan la definición correspondiente a la *American Society of Testing and Materials* (ASTM), la cual define a la rugosidad del pavimento como: “*las desviaciones de una superficie de pavimento con respecto a una superficie plana verdadera, con dimensiones características que afectan la dinámica de los vehículos, calidad de manejo, las cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, perfil longitudinal, perfil transversal y pendiente transversal*”. No obstante, quizás una descripción objetiva de la rugosidad corresponde a la desarrollada por la *Permanent International Association of Road Congresses* (PIARC, 1987), la cual define a la rugosidad del pavimento como el nivel de irregularidades que genera longitudes de onda espaciales del orden de los 0.5 m a los 50 m. En este contexto, un pavimento denominado como “aceptable” considera una rugosidad por debajo de los 2.65 m por km (US-DOT, 2004). De esta forma, la rugosidad de un pavimento implica variaciones en su superficie, las cuales pueden ser caracterizadas por medio de un índice.

1.5.3.1 El índice internacional de rugosidad

Debido a la gran diversidad de técnicas, equipos e indicadores para medir la rugosidad del pavimento, implementados incluso dentro de un mismo país, surgió la necesidad de unificar este conjunto de criterios en un índice único que tuviera aplicabilidad a nivel mundial. Esto condujo al programa internacional denominado *International Road Roughness Experiment* (IRRE) patrocinado por el Banco Mundial en 1986, y que a la postre daría como resultado el desarrollo del concepto denominado Índice Internacional de Rugosidad (IIR), mejor conocido como IRI (*International Roughness Index*) (Sayers *et al.*, 1986).

La importancia del concepto IIR, radica en la posibilidad de evaluar la evolución del pavimento a lo largo del tiempo, a través de la medida objetiva de las irregularidades geométricas presentes en el perfil longitudinal de su superficie (Sayers *et al.*, 1986). A este respecto, Aguerrebere y Cepeda (1991) definen

al IIR como: “la suma de irregularidades verticales (en valor absoluto) a lo largo de la zona de rodadura de un tramo homogéneo de carretera, entre la longitud del mismo”. De forma técnica, el concepto del IIR se refiere a la acumulación de desplazamientos verticales relativos de la masa de un vehículo (masa suspendida) con respecto a la masa del eje (masa no suspendida), divididos entre la distancia recorrida a lo largo de un perfil longitudinal suavizado del pavimento, cuando se simula el paso de un modelo de vehículo “cuarto de carro” (Figura 1-6) a una velocidad de 80 km/hr. Esto implica que las unidades del IIR estén representadas de forma común en mm/m, m/km o plg/mi.

El modelo de vehículo lineal “cuarto de carro” (*Reference Quarter Car Simulation, RQCS* or “*Golden Car*”) referido, se utiliza para filtrar el perfil longitudinal del pavimento para calcular el valor del IIR (Sayers, 1995). Este modelo está constituido por: (i) una sola llanta, representada por un resorte vertical (k_t); (ii) la masa del eje soportada por la llanta (m_t); (iii) el resorte de la suspensión (k_s); (iv) un amortiguador (c_s); y (v) la masa del vehículo soportada por la suspensión de la llanta (Sayers *et al.*, 1986). Las propiedades de rigidez, amortiguamiento e inercia de los componentes de este vehículo han sido normalizadas, como se muestran en la Tabla 1-1 (Cole y Cebon, 1994).

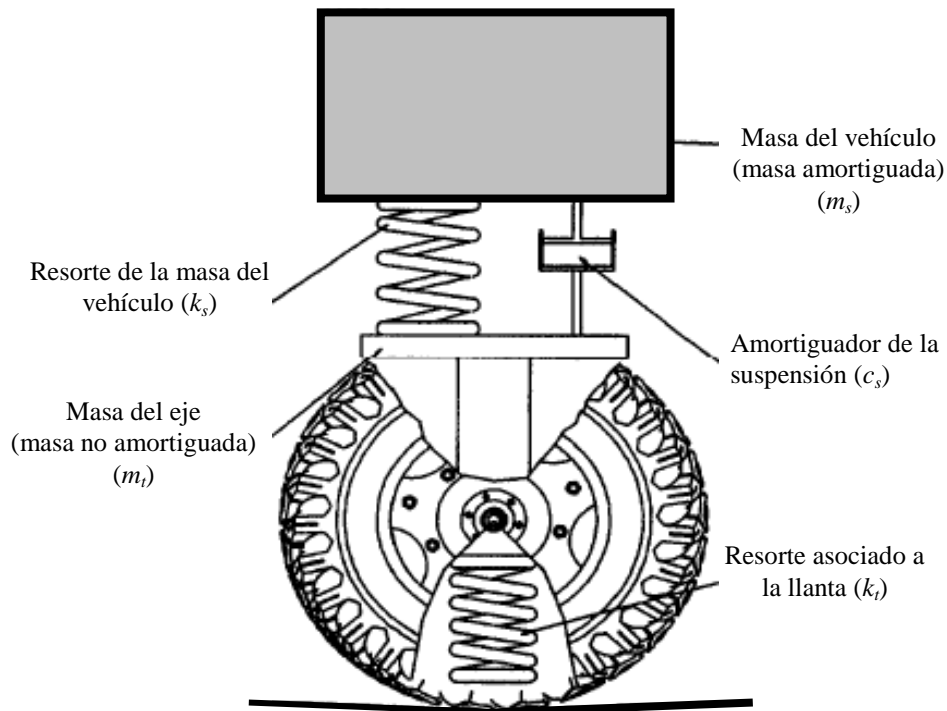


Figura 1-6: Representación gráfica del modelo de vehículo lineal “cuarto de carro” (Romero, 1996).

Tabla 1-1: Propiedades normalizadas para los componentes del vehículo “cuarto de carro” (Cole y Cebon, 1994).

Parámetros Típicos		
	<i>Suspensión de Acero</i>	<i>Suspensión de Aire</i>
m_s	4500 kg	4500 kg
m_t	500 kg	500 kg
k_s	1 MN/m	0.4 MN/m
k_t	2 MN/m	2 MN/m
c_s	20kNs/m	20kNs/m

La Figura 1-7 muestra gráficamente las características de los pavimentos en función del IIR. Incluye además una breve descripción del estado cualitativo del pavimento correspondiente a ciertos rangos.

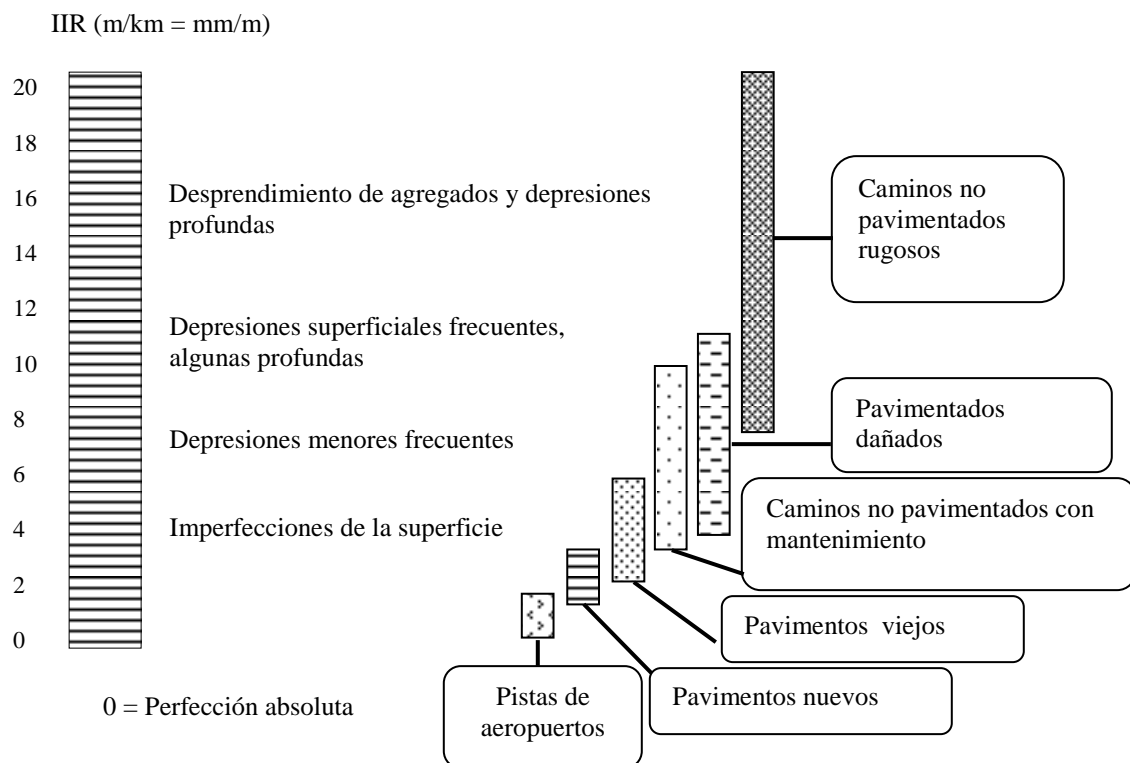


Figura 1-7: Escala de valores del IIR y las características de los pavimentos (Aguerrebere y Cepeda, 1991).

1.5.4 Respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento

La magnitud de las fuerzas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos no es constante, sino que depende tanto de las propiedades de los pavimentos como de las características de los vehículos. Esto es, los vehículos vibrarán por causa del paso por las irregularidades de la superficie de rodamiento, lo que ocasiona a su vez variaciones en los valores de las fuerzas que las llantas ejercen sobre el pavimento. Los factores asociados al vehículo, que determinan su vibración, incluyen las magnitudes tanto de sus masas como de la rigidez de sus suspensiones y llantas.

Estas fuerzas comprenden por lo tanto un valor estático, al que se sobrepone un componente dinámico. Mientras que las cargas estáticas de los vehículos sobre los pavimentos son una función del peso del vehículo y de la distribución de la carga transportada, las cargas dinámicas se derivan de la vibración de las diferentes masas del vehículo, al circular por las irregularidades presentes en el perfil del pavimento (Kitching *et al.*, 1998).

La Figura 1-8 muestra la simulación de la variación en el espacio de las fuerzas del eje delantero de un vehículo tipo C2, como el que se ilustra en dicha figura (Quijada-García, 2005). Estos resultados se presentan para diferentes niveles de carga útil del vehículo, desde 10% hasta 110%, para lo cual se asume un PBV máximo permitido de 17.5 Ton y una tara de cinco Ton. Estas diferentes respuestas del vehículo al perfil del pavimento, se simulan para el tránsito del camión a una velocidad de 80 km/h sobre un pavimento en regular estado.

De esta forma, los resultados de la Figura 1-8 ilustran de manera clara cómo las fuerzas sobre el pavimento varían alrededor de un valor estático. También se puede observar que la variación de los componentes dinámicos de las fuerzas, es una función del nivel de carga.

Con respecto al valor de las fuerzas estáticas, Cebon (1993) propone que la magnitud de las cargas estáticas depende de cuatro componentes, a saber: (i) del PBV; (ii) de la configuración de los ejes (número, carga estática y localización); (iii) de la distribución de la carga estática entre ejes; y (iv) de las condiciones de contacto entre la llanta y el pavimento.

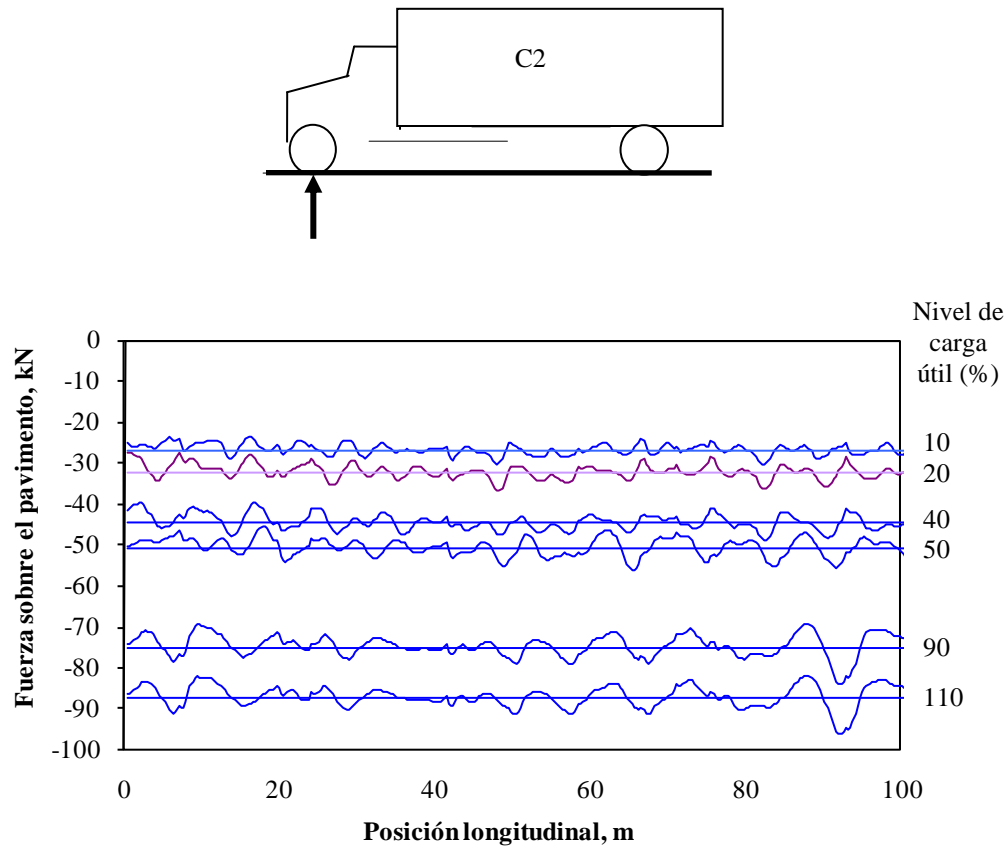


Figura 1-8: Simulación de la variación en el espacio de las cargas del eje delantero de un vehículo tipo C2 sobre el pavimento (Quijada-García, 2005).

En lo que concierne a la magnitud de las cargas dinámicas, este mismo autor (Cebon, 1993) reporta que éstas son función de: (i) las propiedades del pavimento, en cuanto a la rugosidad de la carpeta de rodamiento; y (ii) de las características del vehículo, dentro de las cuales se encuentran su geometría, configuración, distribución de la masa, propiedades de las suspensiones y llantas, además de la velocidad de circulación del vehículo. En lo que se refiere a esta última variable, la respuesta dinámica de los vehículos podría llegar a decrecer a velocidades elevadas, por lo que el daño del pavimento sería menor.

De esta forma, cada una de estas condiciones ocasiona variaciones en las fuerzas aplicadas por los vehículos. Esto provoca que el daño de los pavimentos no sea uniforme a lo largo del camino, por lo que habrá secciones del pavimento que sufrirán un mayor daño que otras. Sin embargo, se estima que las fuerzas dinámicas ejercidas por el paso de vehículos pesados, constituyen una variable importante en lo relacionado al daño prematuro de los pavimentos (Cebon, 1993).

Al respecto, Potter *et al.* (1994) reportan dos principales enfoques para estimar los efectos dañinos de las cargas dinámicas sobre los pavimentos. El primero sugiere que las fuerzas a lo largo de un tramo de pavimento dado serían estadísticamente similares, por lo que el daño se distribuiría uniformemente sobre el camino. En lo que se refiere al segundo enfoque, las fuerzas ejercidas por los vehículos pesados sobre el pavimento, se concentrarían en localizaciones específicas a lo largo del pavimento, lo que produciría el fenómeno conocido como repetitibilidad espacial.

Para el primer enfoque, los estudios muestran entre 20 y 30% de daño producto de las cargas dinámicas, mientras que para la repetitibilidad espacial, las cargas de mayor magnitud se concentrarían en puntos específicos y generarían hasta cuatro veces más daño con respecto a las cargas estáticas, por lo que la distribución del daño del pavimento estaría gobernada por estas localizaciones (Potter *et al.*, 1994).

1.5.5 Medidas de desempeño del efecto de los vehículos sobre el pavimento

La “Prueba AASHO” (AASHO: *American Association of State Highway Officials*) llevada a cabo entre 1958 y 1960, es catalogada como el experimento más completo que se haya emprendido en cuanto al desempeño de los pavimentos como una función de las cargas del tráfico de vehículos pesados.

Sin embargo, se identifican al menos dos limitaciones importantes en torno a tal estudio, a saber (Hudson *et al.*, 2007): (i) la duración de la prueba, que consistió de un periodo de 2 años, lo que implica la consideración de las condiciones climáticas presentes en este relativamente corto periodo de tiempo; y (ii) la prueba se desarrolló en el Estado de Illinois, EUA, por lo que únicamente se consideraron las condiciones ambientales imperantes en esta zona (congelamiento-deshielo y humedad).

No obstante, a partir de este experimento se desarrolló el concepto de Eje Equivalente Estándar (*Equivalent Standard Axle Load*, ESAL), el cual se describe como el eje sencillo con dos llantas en cada extremo, con una presión de inflado de 5.8 kg/cm^2 y que transmite al pavimento una carga estática de 80 kN. De esta forma, la cuantificación de las cargas ejercidas por el tráfico de vehículos sobre el pavimento, ahora se determinaría en términos del ESAL, por lo cual se abandonaría el simple conteo de vehículos para caracterizar las sollicitaciones que tendría que soportar el pavimento. Esto a su vez condujo al

desarrollo de relaciones que caracterizaran el grado de afectación de los ESAL's sobre el desempeño de los pavimentos.

Al respecto, una de las relaciones más importantes que se obtuvo a partir del análisis de los datos obtenidos de la “Prueba ASSHO”, fue el desarrollo de la “Ley de la Cuarta Potencia” (*4th power law or Power force criterion, POW*) (Cebon, 1993). Esta ley convierte la fuerza estática aplicada al pavimento por un cierto número de vehículos, en el decremento del nivel de “servicialidad” causado por los ejes de los vehículos en términos del número de ESAL's y elevados a la cuarta potencia. El concepto de “servicialidad” se refiere a la evaluación subjetiva del confort, seguridad y calidad de rodado del pavimento, llevada a cabo por un panel de usuarios en términos de una escala del 0 al 5, donde el 5 representa un “camino perfecto”, mientras que el 0 denota un camino prácticamente intransitable.

De esta forma, la “Ley de la Cuarta Potencia” es ampliamente utilizada aún hoy en día como base en el diseño de pavimentos flexibles, así como en el estudio del efecto de los vehículos pesados sobre el pavimento (González *et al.*, 2007). Sin embargo, la validez de este enfoque es cuestionable. Por un lado, se sabe que el daño de los caminos es producto de una interacción compleja entre factores asociados al pavimento, los vehículos y las condiciones ambientales (ver Capítulo 2), por lo cual, una aproximación como la mencionada ley resulta demasiado general. Por otro lado, las condiciones actuales prevaecientes en el tráfico mixto de vehículos pesados, son muy diferentes en relación a lo que fueron en la época en que se desarrolló la “Prueba AASHO” (hace 50 años), dentro de las cuales se pueden mencionar: (i) las cargas por eje y configuración de ejes; (ii) los tipos de llantas y presión de inflado; (iii) la construcción de caminos; y (iv) el volumen vehicular (Cebon, 1993).

No obstante, como se describirá en el siguiente capítulo, ninguna medida de desempeño es capaz de integrar todos los aspectos relevantes de la interacción vehículo-pavimento, que incluyen la consideración de características y propiedades tanto de los vehículos como de los pavimentos, además de tomar en cuenta factores ambientales.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

Una revisión histórica de la problemática del transporte, deja en claro que la interacción de los vehículos con el pavimento ha representado una preocupación para todos los involucrados, que incluyen tanto a los administradores como a los usuarios de los caminos. Esto queda de manifiesto en el estudio histórico que presentó Maxwell Lay (Lay, 2008). El autor expresó cómo desde los inicios de la civilización ha sido una preocupación el peso que las ruedas de los vehículos ejercen sobre el pavimento. Así, en el año 50 antes de nuestra era, los Romanos restringieron la carga por vehículo a 250 kgs (2500 N aproximadamente). La invención de los automóviles de motor dio un impulso a los trabajos acerca de los vehículos y su efecto sobre los pavimentos. En Inglaterra se creó el *Highway Research Board* en 1918, con objeto de estudiar básicamente a los pavimentos y los efectos dañinos de los vehículos. Al respecto, y al igual que en muchas situaciones presentes, la motivación de dicho centro fue el de controlar el daño de los pavimentos, a través de imponer restricciones a los pesos de los vehículos.

En este capítulo se describen las aproximaciones reportadas en la literatura acerca del estudio de la interacción vehículo pesado-pavimento. Esto es el producto de una intensa búsqueda de material, al tratar de cubrir los diferentes aspectos que están asociados al objetivo último de esta tesis, en lo que se refiere a desarrollar una medida de desempeño integral del daño potencial de los pavimentos por efecto de los vehículos pesados y que considere las condiciones ambientales.

En la primera parte de este capítulo se destaca la importancia económica que representa la infraestructura carretera, tanto para los administradores como para los usuarios de estos recursos, en términos del daño que sufren los pavimentos y los vehículos. Posteriormente, se describen los aspectos normativos que los gobiernos de las diferentes naciones emplean y diseñan para lograr un uso eficiente de la infraestructura de transporte. Como tercer grupo de reportes, se discuten aquellos que incluyen propuestas concretas para cobrar el uso de las infraestructuras, en función del daño producto de los vehículos pesados y de los costos de rehabilitación asociados. De manera particular se atienden los esquemas propuestos en las carreteras de cuota, referentes al cobro “inteligente” de los peajes, acorde con el tramo de camino y las condiciones de operación de los vehículos. En seguida, se tratan de forma general los reportes acerca de los aspectos físicos de la interacción vehículo pesado-pavimento. Algunos de estos aspectos, que se consideran dentro de los más relevantes, se abordan por separado. Finalmente, se analiza un estudio sobre las diversas medidas de desempeño reportadas en la literatura, el cual tiene como objetivo identificar las características más importantes de estos modelos, así como sus deficiencias.

2.1 Importancia económica de la interacción vehículo - pavimento

De manera general, sin importar el país de donde proceda la información, el mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera representa importantes sumas de dinero a los administradores de estos recursos (Cebon, 1999).

Sin incluir algunas externalidades derivadas del mal estado de las infraestructuras (el costo social definido por Tellis y Khisty, 1997), los dos principales tipos de costos directos producto del estado de los caminos, pueden ser agrupados en: (i) aquellos que son incurridos por el proveedor de la infraestructura por concepto de mantenimiento, conservación y rehabilitación de los caminos; y (ii) los costos incurridos por los usuarios de un camino en mal estado, debido al daño que sufre el vehículo y al incremento en el consumo de combustible (Small *et al.*, 1989; Newbery, 1988).

En 2002, los gobiernos estatales y locales de Estados Unidos de América (EUA) designaron más de la mitad de su presupuesto en la preservación de sus caminos y puentes (US-DOT, 2004), producto de los efectos positivos que generan tales medidas. Esto es, se estima que los ahorros en la operación de los

vehículos aunados a la seguridad carretera, derivados de la circulación en infraestructuras en buen estado, alcanzan montos anuales del orden de 30 mil millones de dólares (TRIP, 2006).

Por otro lado, el retraso en la aplicación de los programas de mantenimiento tiene costos muy altos. Al respecto, se calcula que los caminos que reciben un mantenimiento inadecuado en este país, generan pérdidas cercanas a los 30 mil millones de dólares anuales, debido al desgaste que sufren los componentes de los vehículos y al consumo adicional de combustible, producto del paso por pavimentos dañados (Small *et al.*, 1989).

De esta forma, se reconoce la gran importancia que tienen una adecuada programación y selección de los trabajos de mantenimiento y conservación de los caminos. Un mantenimiento inapropiado, genera un alto impacto económico negativo en el inventario de infraestructura carretera existente. Se estima que los países en desarrollo, durante las décadas de los 70's y 80's, tuvieron pérdidas en valor de infraestructura de transporte por aproximadamente 45 mil millones de dólares debido a un mantenimiento inadecuado, las cuales podrían haber sido evitadas al gastar solamente 12 mil millones de dólares en mantenimiento preventivo (Harrall y Faiz, 1988).

En México, se considera que las partidas presupuestales asignadas para la conservación y mantenimiento de las infraestructuras viales, son inversiones. Para el año de 2008, el presupuesto para tales inversiones fue de 9 mil 630 millones de pesos (GR, Febrero 8 de 2008). La infraestructura carretera a ser atendida prioritariamente mediante este recurso, fue de ocho mil km de un total de 40 mil km de carreteras libres. De esta forma, tan sólo en este año se invirtió, *grosso modo*, un millón de pesos por cada km de carretera libre con que se cuenta. Se reporta que con estos montos se esperaba elevar el índice de servicio de estos caminos, desde el muy bajo a uno prácticamente ideal.

Sin embargo, como lo señala Moreno (2004), la mayor parte del costo económico incurrido por los administradores de la infraestructura carretera (traducido en costos de mantenimiento y rehabilitación de los caminos) es atribuible a los vehículos pesados. En este contexto, se han estimado los costos por el uso de las infraestructuras, como una función del tipo de vehículo y el nivel de carga reglamentario.

A manera de ejemplo de estas aproximaciones, la Figura 2-1 muestra los costos producto del daño de pavimentos para el Peso Bruto Vehicular (PBV) máximo autorizado en México, correspondiente a cinco tipos de vehículos pesados, los cuales están conformados por: (i) camiones unitarios de dos ejes, o C2; (ii) camiones unitarios de tres ejes, o C3; (iii) tractocamiones articulados de tres ejes en el tractor y dos ejes en el semirremolque, o T3-S2; (iv) tractocamiones articulados de tres ejes en el tractor y tres ejes en el semirremolque, o T3-S3; y (v) tractocamiones doblemente articulados de tres ejes en el tractor con dos y cuatro ejes en los semirremolque respectivamente, o T3-S2-R4 (Mendoza y Gutiérrez, 1994).

En esta figura, se puede observar que para los pesos máximos reglamentados, el costo por daño del pavimento por Ton-km de carga transportada y ocasionado por el vehículo C2, es aproximadamente 60% mayor que el generado por el vehículo T3-S3, que corresponde al vehículo que genera el menor daño.

Si bien, los resultados de la Figura 2-1 son útiles para determinar el grado de agresividad de los diferentes vehículos para con el pavimento, también son demasiado agregados. Esto es, sería adecuado observar el efecto por separado de los diferentes factores que intervienen en la interacción.

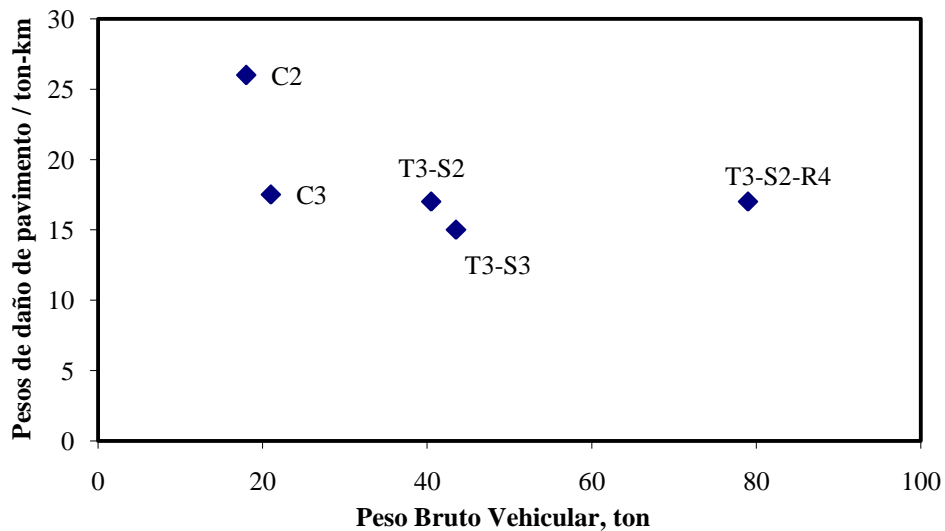


Figura 2-1: Costo del daño de pavimento/Ton-km para cinco tipos de vehículos pesados (con datos de Mendoza y Gutiérrez, 1994).

Adicionalmente, en la evaluación del impacto económico producto del daño de los pavimentos por efecto del tráfico de vehículos pesados, es necesario incorporar las prácticas abusivas en el uso de las infraestructuras, representadas por la práctica de sobrecargar a los vehículos. Al respecto, Straus y Semmens (2006) estimaron que los vehículos pesados al operar bajo condiciones de sobrecarga, generaron hasta 57% más daño en las carreteras de Arizona en 2006, con respecto a los vehículos que transportaron la carga máxima legal permitida.

2.2 Aspectos normativos

Las normas que emiten las autoridades carreteras alrededor del mundo, pueden ser clasificadas en la actualidad en: (i) normas que fijan las características estáticas que el vehículo debe cumplir; y (ii) normas de desempeño. Las primeras, representan inflexibilidad y se dirigen a las propiedades estáticas de los vehículos, tales como el PBV, el peso por eje y las dimensiones generales (largo, ancho y alto), entre otras. Las segundas, atienden de manera flexible las características de los vehículos, siempre y cuando cumplan con los requisitos de funcionamiento especificados. Estas últimas han sido aplicadas en Europa, fundamentalmente en Australia (NTC, 2005).

De esta forma, las normas de desempeño referentes a la suavidad de marcha y otros efectos, tales como acelerabilidad y arranque en pendiente, han sido especificadas de manera detallada. Sin embargo, las normas de desempeño referentes a la infraestructura se hallan todavía en sus primeras etapas de desarrollo. A este respecto, se identifican las siguientes (Rolland *et al.*, 2006):



- Cargas verticales sobre el pavimento;
- Cargas horizontales sobre el pavimento;
- Distribución de las presiones de contacto en las llantas; y
- Cargas sobre los puentes.

De este grupo, únicamente se han desarrollado las normas de desempeño correspondientes a las cargas verticales.

Al considerar a las normas de desempeño como indicadoras de un cierto avance en los mecanismos de regulación de los vehículos, en la perspectiva de no limitar la creatividad de los fabricantes, en México se está todavía en la etapa de normas estáticas. Un ejemplo de esta situación, se identifica en el momento de observar que la Norma Oficial Mexicana sobre el peso y dimensiones con los que pueden circular los vehículos de autotransporte (NOM-012-SCT-2-2008), permite sobrecargas en el caso de ejes equipados con suspensiones de aire, pero no indica el estado que deben tener éstas en cuanto a los amortiguadores y demás componentes involucrados. Sin embargo, como se describirá más adelante en este capítulo, una suspensión de aire equipada con amortiguadores dañados, puede resultar más dañina al pavimento que la tradicional suspensión de muelles (Cebon, 1999).




A manera de ejemplo, la Tabla 2-1 lista las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 para el PBV de los camiones unitarios, como una función del número de ejes, número de llantas y del tipo de carretera donde circulen (SCT, 2008). Las notas acerca de las tolerancias por el uso de suspensiones de aire se indican aparte.

Tabla 2-1: Ejemplo de una normatividad de pesos y dimensiones en México para el PBV del camión unitario (SCT, 2008).

CAMION UNITARIO						
VEHÍCULO O CONFIGURACIÓN VEHICULAR	NUMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (Ton)			
			ET Y A	B	C	D
C2 	2	6	17,50	16,50	14,50	13,00
C3 	3	8	21,50	19,00	17,00	16,00
	3	10	24,50	23,00	20,00	18,50

Mientras que la Tabla 2-1 se refiere al PBV, se tienen asimismo especificaciones del peso transmitido al pavimento por cada uno de los ejes, en función del número de llantas y del tipo de camino, como se muestra en la Tabla 2-2 (SCT, 2008). Es importante destacar que la suma de los pesos permitidos por eje listados en esta tabla, no conduce necesariamente al PBV permitido. Esto se debe al efecto de los vehículos pesados sobre los puentes, ya que entre menor sea la distancia entre ejes, mayor es el daño causado a este tipo de infraestructuras.

Tabla 2-2: Ejemplo de una normatividad de pesos y dimensiones en México para los ejes de los vehículos pesados (SCT, 2008).

CONFIGURACION DE EJES			TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
		SENCILLO DOS LLANTAS	6,50	6,00	5,50	5,00
		SENCILLO CUATRO LLANTAS	10,00	9,50	8,00	7,00
		MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	11,00	10,50	9,00	8,00
		MOTRIZ DOBLE O TANDEM SEIS LLANTAS	15,00	13,00	11,50	11,00
		DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	17,00	15,00	13,50	12,00
		MOTRIZ DOBLE O TANDEM OCHO LLANTAS	18,00	17,00	14,50	13,50

Adicionalmente, estas normas revelan otras limitaciones aún en el caso de sus características estáticas. Una de ellas, se refiere a los pesos de los ejes individuales al considerarlos dentro de un conjunto (tándem o tridem). Esto es, no se especifica ninguna limitación acerca de la diferencia máxima permisible entre las cargas de los ejes al considerarlos individualmente (SCT, 2008).

2.3 Cargos por uso de la infraestructura

En general, ha prevalecido la idea de que los usuarios de la infraestructura de transporte no pagan la totalidad de los costos producto del uso de sus automóviles. Tales costos se han clasificado en cuatro categorías principales: (i) costos por congestión del tráfico; (ii) costos producto de accidentes; (iii) costos ambientales (contaminación del aire, ruido, etc.); y (iv) costos por mantenimiento de los caminos (Newbery, 1988). Aunque tal percepción data de hace bastantes años, se considera vigente en la medida de que la situación no sólo se ha mantenido sino que ha empeorado en muchas ocasiones.

Si esto es así en el caso de los automóviles, tal situación se ve agravada al considerar a los vehículos pesados. Esto es, dichos vehículos generan daños a los caminos que exceden significativamente a los que son producto de vehículos más ligeros. Al respecto, según datos de la *American Association of State Highway and Transport Officials* (AASHTO) un vehículo de cinco ejes (T3-S2) con una carga de 80 mil lbs, genera daños al pavimento tan altos que en promedio se aproxima al inducido por 9 mil 600 vehículos de pasajeros ligeros (Ankner, 2002). Sin embargo, las tarifas que pagan los automóviles en una carretera de cuota no guardan esta proporción. Por ejemplo, un vehículo pesado de cinco ejes paga solo 27% más que un automóvil en un tramo carretero de cuota típico de México (CAPUFE, 2008).

Estas discrepancias o anormalidades, referentes a las políticas de cobro de peaje, se encuentran no tan sólo al comparar los costos relativos asociados a los automóviles o a los vehículos pesados, sino que se presentan en el contexto mismo de los vehículos comerciales. De esta forma, a pesar de que se han propuesto diferentes parámetros para establecer los conceptos de costo por uso de las infraestructuras carreteras (que incluyen al peso dinámico por eje, el número de ejes, el tipo de eje, las propiedades de las llantas, las propiedades de los pavimentos y la distancia recorrida), los criterios tarifarios establecidos en la actualidad han considerado de manera exclusiva los aspectos relativos al número de ejes y a la distancia recorrida (Amoo-Dodoo y Thorpe, 2005). Además, las casetas de cobro con cuota flexible se centran en políticas de costo enfocadas al control del congestionamiento vehicular en las ciudades (Holquín-Veras, 2008; Tan y Subramaniam, 2006).

El hecho de que estas políticas de cobro por uso de la infraestructura no reflejan el daño causado al pavimento por los diferentes tipos de vehículos, ha sido expuesto con antelación (Hussain y Parker, 2006;

Amoo-Dodoo y Thorpe, 2005). Por lo tanto, en el siguiente punto únicamente se describen los esquemas de asignación de costos por uso de infraestructura implementados en algunas carreteras alrededor del mundo. Posteriormente, se describen los esquemas propuestos para lograr una distribución de estos cargos en la medida del daño que los vehículos pesados generan en estas infraestructuras.

2.3.1 Esquemas de asignación de costos implementados

Con el desarrollo de los caminos de cuota, se consideraría la asignación de las tarifas en función del daño que provocan los vehículos al pavimento. De esta forma, el concepto básico detrás de este esquema es el de internalizar los costos externos. Dicho concepto, nace de la idea de aplicar de manera directa los costos financieros y de conservación de la infraestructura carretera a los usuarios. Sin embargo, las tarifas aplicadas son producto de distribuir estos costos por igual entre los usuarios, divididos, a lo sumo, en tipos vehiculares y sin importar si el vehículo está cargado o vacío. Por lo cual, los usuarios de los caminos no pagan en función del daño que sus unidades ocasionan al camino.

Lo anterior se puede verificar al analizar el caso de México, al considerar que las cuotas de los vehículos pesados C2 y C3 son las mismas, a pesar de que el nivel de daño producido por ambos tipos de vehículos es diferente (Romero, 2000; Rico *et al.*, 1988). En particular, se identifican los siguientes tres grupos de tarifas asignadas a los vehículos pesados: (i) camiones de 2 y 3 ejes; (ii) camiones de 4 y 5 ejes; y (iii) camiones de 6, 7, 8 y 9 ejes (CAPUFE, 2008). A este respecto, la tarifa es más elevada a medida que incrementa el número de ejes, no obstante que un mayor número de ejes implica una mejor distribución de las cargas y podrían generar menores daños al pavimento (Moreno, 2004). De igual manera, Hussain y Parker (2006) reportan un caso similar en la mayoría de las autopistas de peaje en EUA.

La situación en Europa, con respecto a algunos esquemas de cobro de peaje, es reportada por Moreno (2004). Al respecto, se cuenta con la “Directiva de la Euroviñeta”, aprobada por el Parlamento Europeo en 1996, la cual considera un esquema de tres tarifas diferenciales basado en el impacto de los vehículos pesados en el medio ambiente y la infraestructura, a saber: (i) EURO-0; (ii) EURO-I; y (iii) EURO-II. Esta clasificación, reduce el cargo a medida que los vehículos pesados disminuyen sus emisiones contaminantes y transportan una menor carga. En el caso particular de Suiza, se introdujo un sistema de tarifas diferenciales acorde con la clasificación europea y aplicada a los vehículos pesados en función del

peso y la distancia recorrida. En el verano de 2003, Alemania reemplazó el esquema “Euroviñeta” y lo sustituyó por un sistema tarifario basado en la distancia recorrida e incorporó un sistema de cobro completamente electrónico. Adicionalmente a estos esquemas, en Europa también se han implementado cargos por congestiónamiento vial (Santos y Rojey, 2003). Este tipo de tarifa no incorpora una relación directa entre el nivel de carga y el daño al pavimento, por lo que es utilizado principalmente como una herramienta para administrar el nivel de tráfico, es decir, reducir la demanda e incrementar la velocidad de los vehículos (Chu y Tsai, 2004; Santos y Rojey, 2003).

En Norteamérica, otro esquema novedoso corresponde al implementado en la carretera 407, en Toronto Canadá. El sistema de cobro no requiere casetas debido a que utiliza tecnología de *transponders* o de identificación de placas, esto con el objeto de registrar la entrada y salida de los vehículos. Posteriormente, el cargo por uso de camino es enviado a domicilio. La tarifa considera la variación horaria (a manera de cargo por congestiónamiento) y el tipo de vehículo. Sin embargo, no toma en cuenta muchos otros factores relacionados con el daño de los pavimentos, tales como el nivel de carga, características de los vehículos y vulnerabilidad del pavimento (Romero *et al.*, 2006).

A la luz de la información hasta ahora discutida, es importante destacar que el sistema tarifario tal como está, en el que los gastos se distribuyen bajo un esquema de tarifa plana, constituye un sistema injusto de cobro y de asignación de costos. De esta forma, bajo los actuales esquemas tarifarios, que básicamente son los mismos de la década pasada, se ha estimado que los vehículos pesados sub-pagan el costo de responsabilidad del daño que ocasionan al pavimento hasta en 50%, mientras que los camiones más ligeros sobre-pagan este costo hasta por 150% (US-DOT, 2004).

2.3.2 Esquemas de asignación de costos propuestos

Straus y Semmes (2006) realizaron un estudio para estimar el costo de la sobrecarga de los vehículos pesados que circularon en las carreteras de Arizona, basado en la “Ley de la Cuarta Potencia” (ver Capítulo 1 apartado de Generalidades). En este estudio los costos producto del mantenimiento y rehabilitación de la red carretera, se tomaron con base en las estimaciones realizadas por los gobiernos locales y estatales. De acuerdo con este enfoque, los costos por milla de camino ocasionados por los vehículos sobrecargados, es del orden de un millón de dólares por año. Sin embargo, dentro de las

limitaciones más importantes de este estudio, se encuentra precisamente en la de haber utilizado el criterio de la cuarta potencia, debido a que este enfoque no toma en cuenta el daño diferencial sobre el pavimento de algunos de los factores que intervienen en la interacción vehículo-pavimento, tales como la temperatura, la velocidad de aplicación de la carga y las propiedades de los vehículos. Dentro de estas últimas, se pueden mencionar la distancia entre ejes, el tipo de suspensiones empleado, la presión de inflado de las llantas, entre otras.

Otra aproximación para asignar los costos de la carretera, corresponde a la desarrollada por Rico *et al.* (1995), que consistió del establecimiento de la tarifa óptima en una autopista de cuota. Este estudio se basó en el reporte publicado por Mendoza y Gutiérrez (1994), en el cual se desarrolló un análisis económico del impacto de los vehículos pesados sobre los pavimentos y puentes. En este análisis se utilizó el concepto de eje equivalente estándar, mejor conocido como ESAL (*Equivalent Standard Axle Load*) (ver Capítulo 1 apartado de Generalidades), como unidad de medida para caracterizar el daño producto de distintos tipos de vehículos. Para lo cual, el costo asociado a la aplicación de un ESAL sobre el pavimento, fue determinado a partir de la división en tramos homogéneos de la red carretera básica nacional mexicana, en función del número de repeticiones de ESAL's estimados para un periodo de 10 años. Posteriormente, a cada tramo de pavimento se le asignaron los costos de construcción por km con base en su espesor. Adicionalmente, se incluyeron los montos producto de las acciones de mantenimiento y rehabilitación, necesarias para evitar sobre-costos de operación vehicular. En seguida, se dividió la suma de los costos de construcción y de mantenimiento entre el número de repeticiones de ESAL's, previamente calculado. El valor resultante representó el costo por concepto del daño de los pavimentos al aplicar un ESAL en un km de camino. Finalmente, en el estudio presentado por Rico *et al.* (1995), este costo fue multiplicado tanto por la longitud en km del tramo de carretera de cuota como por el número de ESAL's que representa el vehículo pesado al que se le hace el cargo.

No obstante la lógica del método empleado, este esquema adolece en cuanto a la consideración de algunos efectos. En particular, al asumir estimaciones promedio se “atenúa” el efecto de los valores extremos que se pueden presentar en una situación real de tráfico, tales como la variación de la temperatura a lo largo del día y la variación de la velocidad (congestionamiento en un caso extremo), por mencionar los más importantes (Romero *et al.*, 2009; Romero y Lozano, 2006; Kim *et al.*, 2005; Arriaga y Garnica, 1998).

En contrapartida a estos esquemas simplistas en los que se toman en cuenta de manera exclusiva estimaciones promedio, se tienen los modelos de predicción del desempeño de los pavimentos a largo plazo (*Whole-Life Pavement Performance Model*, WLPPM, Collop, 1993), que por el contrario, permiten considerar por separado un gran número de variables que afectan al pavimento. Si bien, este tipo de modelos permitiría el desarrollo de metodologías para establecer una asignación de costos en la medida del daño que cada vehículo genera en el pavimento, su aplicación no ha sido factible dada la complejidad del algoritmo de solución empleado y, por lo tanto, demandan de poderosos medios computacionales (Romero, 2000).

Sin embargo, de forma intermedia entre estas dos aproximaciones se tienen algunos ejemplos de enfoques en los que se establecería una cuota flexible, basada en el daño que cada vehículo genera al pavimento al tomar en cuenta diversas variables asociadas a los vehículos y pavimentos, para lo cual requieren plataformas de cómputo convencionales.

Así, dentro de estos enfoques se tiene el esquema realizado por Hussain y Parker (2006), quienes utilizaron el modelo empírico-mecanicista denominado KENLAYER (Huang, 2004) para desarrollar un sistema tarifario basado en el daño que los vehículos pesados generan en el pavimento, en función de diversas variables que intervienen en la interacción, tales como el tipo de vehículo, velocidad de operación, carga por eje, distancia entre ejes, presión de inflado de las llantas y propiedades del pavimento. Sin embargo, una carencia de este enfoque consiste en haber omitido el efecto de la temperatura de los pavimentos. Esto se considera una limitación importante, ya que es bien conocido que los pavimentos flexibles (asfálticos) son altamente sensibles a la temperatura, debido a que pierden rigidez con el incremento de ésta, por lo que se vuelven mucho más vulnerables a la deformación permanente y falla por fatiga (Romero *et al.*, 2006; Lukanen *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Ongel y Harvey, 2004; Rico *et al.*, 1998A; Collop, 1993).

Dentro de esta misma línea, Romero *et al.* (2006) reportaron un diseño conceptual de una caseta de cobro “inteligente”, que permite distribuir de forma equitativa los costos producto del uso que los vehículos hacen de la infraestructura. Para esto, proponen el uso de un modelo empírico-mecanicista validado y basado en la energía de deformación (la cual se traduce como daño potencial del pavimento) que se almacena transitoriamente en el interior del pavimento producto del paso de los vehículos. Este modelo

permite la simulación masiva de los vehículos pesados al circular por longitudes reales de pavimento, para lo cual demanda plataformas de cómputo convencionales. Además, al igual que en el enfoque propuesto por Hussain y Parker (2006), es posible incorporar diversas variables asociadas tanto a los vehículos como a los pavimentos. Sin embargo, cabe resaltar el hecho que de forma adicional toma en cuenta la temperatura del pavimento. No obstante, el desarrollo metodológico para utilizar este modelo como base del esquema tarifario, es propuesto únicamente como una línea de investigación futura.

De esta forma, con base en los esquemas hasta ahora descritos, se puede identificar una metodología ideal para la asignación de cargos por el uso de las infraestructuras, en torno al concepto de distribuir los costos marginales producto del daño de los pavimentos en función del grado de afectación que ocasione cada vehículo pesado, es decir, en crear un esquema de asignación de costos equitativo. Tal metodología, puede ser resumida de forma general en tres pasos: (i) la cuantificación del daño de los pavimentos producto del paso de los vehículos en tiempo real, por medio de modelos validados que permitan la simulación masiva de las características asociadas a un tráfico mixto de vehículos pesados, al circular por longitudes reales de caminos e incorporar distintas propiedades del pavimento, así como condiciones de operación cambiantes (velocidad de operación de los vehículos y temperatura del pavimento); (ii) la estimación económica del daño de los caminos, con base en los costos por concepto del mantenimiento y rehabilitación del pavimento; y (iii) la asignación del costo marginal al daño que cada vehículo produce al pavimento, en función de las características del vehículo, pavimento y condiciones ambientales presentes.

2.4 Estudios de los aspectos físicos de la interacción vehículo pesado – pavimento

Los dos sistemas (vehículo y pavimento) involucrados en el presente estudio, tienen como frontera común el área de contacto de la llanta con el pavimento o “pisada”. Es en esta área donde se aplican las fuerzas de los vehículos y los efectos los reciente el pavimento, como una función de diversos factores que incluyen al pavimento, al vehículo y a las condiciones ambientales (Cebon, 1999). Dada la importancia económica, la interacción vehículo-pavimento ha recibido atención a través de numerosos estudios, que involucran ya sea aspectos específicos de la interacción o aproximaciones integrales que tratan de incluir la mayor cantidad de variables posibles. Los aspectos más relevantes de estos estudios son presentados en los siguientes puntos.

2.4.1 Efectos ambientales sobre el daño de los pavimentos

Aunque las condiciones ambientales, en cuanto a humedad y temperatura, pueden por sí mismas definir el nivel de daño de los pavimentos, a través de esfuerzos térmicos y por los ciclos de congelamiento y deshielo (Collop, 1993), influyen significativamente en el daño de los pavimentos al transitar sobre ellos los vehículos pesados (Al-Qadi *et al.*, 2004). En este contexto y, a pesar de que los factores climáticos que influyen en el daño de los pavimentos incluyen a las precipitaciones pluviales y de nieve (Luo, 2005), la temperatura es considerada como la característica ambiental más significativa en cuanto al daño potencial del pavimento, especialmente cuando se trata de pavimentos asfálticos (Lukanen *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Ongel y Harvey, 2004; Amoo-Dodoo y Thorpe, 2005; Collop, 1993).

La vulnerabilidad de los pavimentos asfálticos a las cargas de los vehículos aumenta de manera drástica con el incremento de la temperatura del pavimento, como ha sido reportado en diversos estudios (Boilé *et al.*, 2003; Cole y Cebon, 1994; Collop, 1993). Tal importancia ha originado estudios específicos, tendientes a caracterizar el efecto de la temperatura sobre el daño de los pavimentos a largo plazo (Lukanen *et al.*, 2005).

En particular, Collop (1993) llevó a cabo un análisis exhaustivo sobre el efecto de la temperatura del pavimento, en cuanto al crecimiento de las roderas de los pavimentos durante el paso de los vehículos pesados, para lo cual simuló la variación en el tiempo de la fluencia térmica del asfalto al ser sometido a temperaturas elevadas.

Ongel y Harvey (2004) reportaron análisis cualitativos que describen el daño diferenciado del pavimento (fatiga o roderas), como una función del espesor del pavimento. Kim *et al.* (2005) reportaron la deformación del pavimento como una función de la temperatura, la cual es mostrada en la Figura 2-2. De acuerdo a estos resultados, una variación hacia arriba de 8.4% en la temperatura absoluta del pavimento, implica una variación de 730% en el deterioro del pavimento.

A este respecto, Romero *et al.* (2006) llevaron a cabo la simulación de un flujo mixto de vehículos pesados sobre pavimentos asfálticos y encontraron que el efecto combinado entre la carga transportada, la

velocidad de circulación y la temperatura del pavimento, implicaría una relación de 50 a 1 entre el mayor y menor daño causado por alguno de los vehículos en el tráfico.

De esta manera, aunque se ha reconocido el efecto de la temperatura sobre la vulnerabilidad de los pavimentos asfálticos a través incluso de aproximaciones experimentales exhaustivas (DOT, 2004), no se ha reportado todavía un estudio paramétrico que permita cuantificar de manera objetiva el efecto de la temperatura sobre el nivel de daño de los pavimentos. De alguna forma, en esta tesis se presenta una propuesta al respecto (ver Capítulo 3).

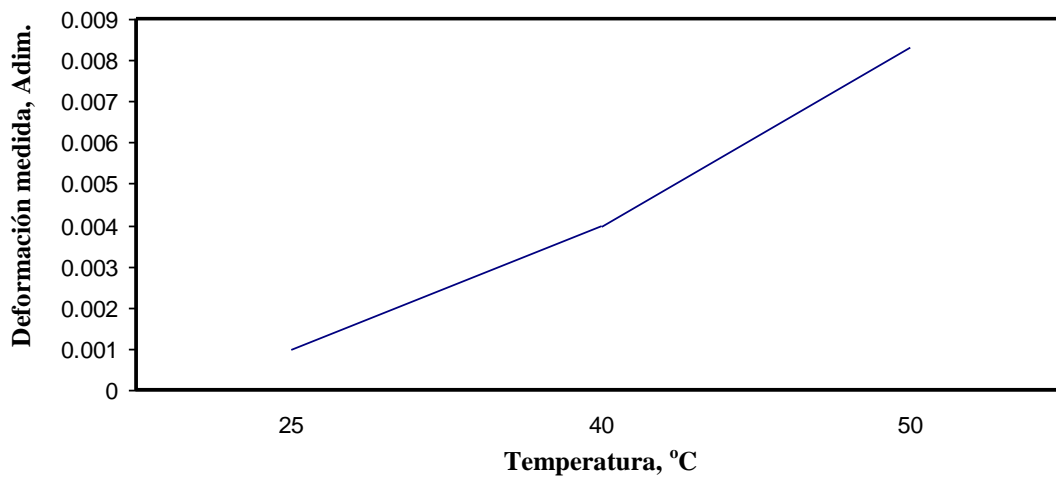


Figura 2-2: Efecto de la temperatura sobre la deformación de una muestra de asfalto (con información de Kim *et al.*, 2005).

2.4.2 Propiedades de los vehículos y el daño de los pavimentos

Las diversas aproximaciones para caracterizar el daño de los pavimentos en función de las propiedades de los vehículos, ha dado lugar al término “amigabilidad” utilizado para describir el efecto menos perjudicial que los componentes de los vehículos pudieran tener para con el pavimento (Cebon, 1999).

Al respecto, como parte de las conclusiones del experimento DIVINE (*Dynamic Interaction Between Vehicle and Infrastructure Experiment*), se reportó que las suspensiones convencionales tipo balancín (*walking beam*) pueden llegar a producir el doble de desgaste en el pavimento al compararlas con las suspensiones de aire (OCDE, 1998). La Figura 2-3 muestra una representación esquemática de este tipo de suspensión.

Las suspensiones automotrices que han recibido la calificación de “amigables” para con el pavimento, incluyen a las suspensiones de aire (OCDE, 1998) y a las *torsilastic*. Sin embargo, Cebon (1999) señala que una suspensión de aire equipada con amortiguadores defectuosos, puede resultar más agresiva para con el pavimento al compararla con las suspensiones de muelles.

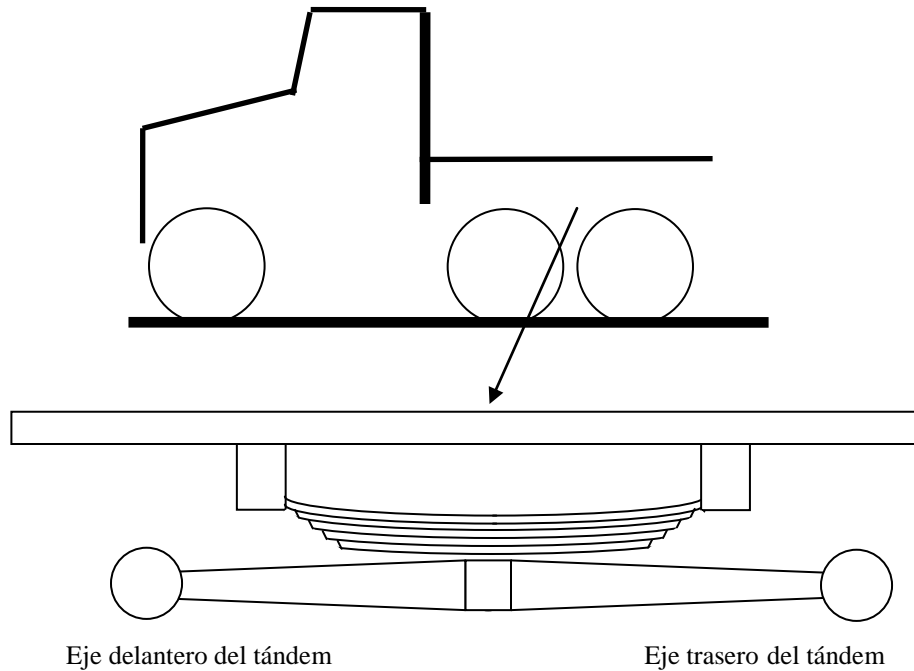


Figura 2-3: Suspensión de “viga viajera” o “*walking beam*”.

2.4.3 Características de los pavimentos y su daño

Ha sido una percepción común que el daño de los pavimento incrementa con su rugosidad (Hassan y McManus, 2003). Al respecto, Fekpe (2006, 1999) empleó diferentes medidas estadísticas para correlacionar tanto la velocidad del vehículo como la rugosidad del pavimento, con los componentes dinámicos de las cargas de los vehículos sobre los pavimentos, a partir de la consideración de los ESAL's. La Figura 2-4 muestra los resultados de esta aproximación, elaborada por Romero *et al.* (2009) con base en datos de Fekpe, en función de la velocidad de los vehículos. De esta manera, el daño potencial de los pavimentos se incrementa de manera marginal al aumentar la rugosidad, siempre y cuando la velocidad del vehículo sea baja. Para velocidades más elevadas, los resultados acusan un incremento notable del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento.

Gillespie *et al.* (1993) también reportaron la influencia de la rugosidad del pavimento sobre su daño potencial, producto del paso de los vehículos pesados. Tales reportes, revelan que existiría una relación casi lineal entre la rugosidad del pavimento y las cargas de los vehículos pesados sobre el daño de los pavimentos, como se muestra en la Figura 2-5 elaborada por Romero *et al.* (2009) con base en resultados de Gillespie *et al.* (1993).

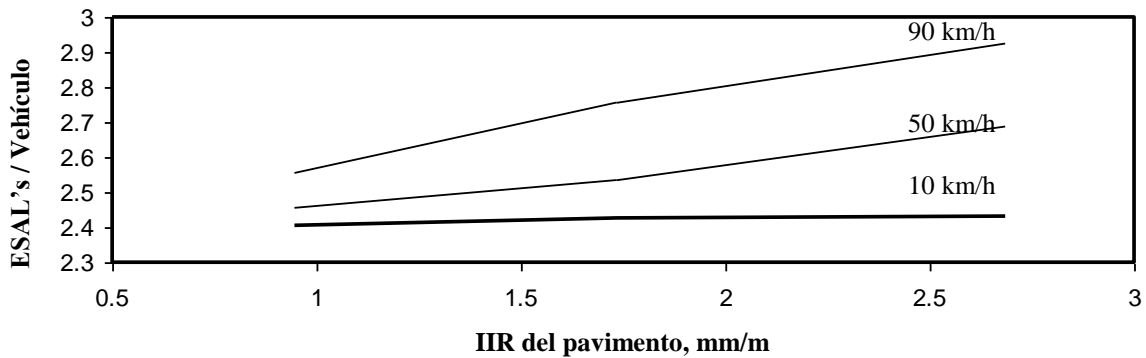


Figura 2-4: Efecto de la rugosidad y de la velocidad sobre el daño potencial de los pavimentos (Romero *et al.* (2009), con datos de Fekpe (2006)).

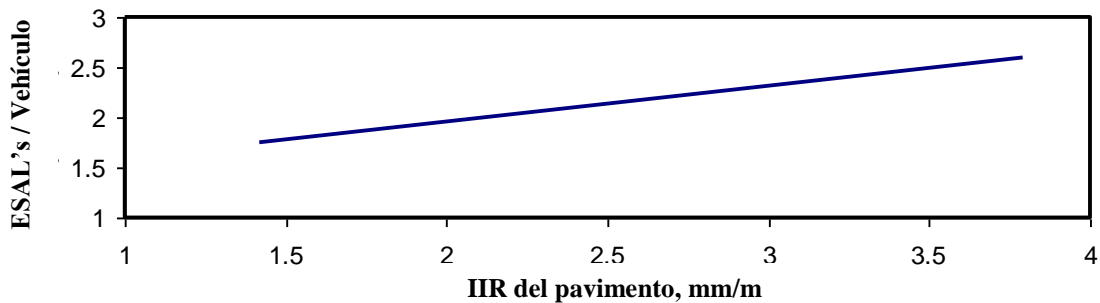


Figura 2-5: Efecto de la rugosidad del pavimento sobre la fatiga potencial del pavimento (Romero *et al.* (2009), con datos de Gillespie *et al.* (1993)).

2.4.4 Efecto de la velocidad de los vehículos y el daño de los pavimentos

Al haber pocas referencias sobre la relación existente entre la velocidad de los vehículos y el daño de los pavimentos, hay incertidumbre en cuanto a los efectos asociados a esta interacción.

Fekpe (2006, 1999) reportó el efecto potencial de la velocidad de los vehículos sobre el daño de los pavimentos, como se muestra en la Figura 2-6 elaborada por Romero *et al.* (2009) con datos de Fekpe (2006).

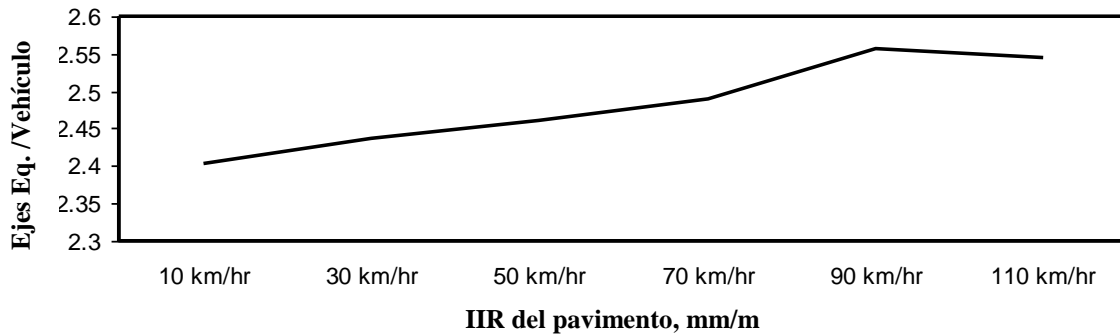


Figura 2-6: Variación simulada del efecto dañino de los vehículos sobre el pavimento como una función de la velocidad (vehículo clase autobús, IIR = 0.94 mm/m) (Romero *et al.* (2009), con datos de Fekpe (2006)).

2.4.5 Distribución espacial del daño en los pavimentos por los vehículos pesados

La distribución espacial desigual del daño a lo largo del perfil del pavimento producto del tráfico de vehículos, la cual implica que en partes de éste se concentren los efectos dañinos de los vehículos, ha sido identificada desde los principios del uso de vehículos automotores (Cebon, 1999). Sin embargo, aparentemente por los elevados costos de conservación de las infraestructuras, en la década de los noventa este tópico de investigación recibió un nuevo impulso (Kenis *et al.*, 1998; OECD, 1998; Cole *et al.*, 1996; Jacob, 1995; LeBlanc y Woodrooffe, 1995; Moran *et al.*, 1995; Gyenes y Mitchell, 1994).

Cole *et al.* (1996) reportaron que el daño en partes críticas del pavimento, comparado con el resto del camino, puede llegar a incrementarse hasta el doble. Gyenes y Mitchell (1994) pronosticaron que a lo largo del perfil del pavimento, habría puntos en los que el daño se concentraría hasta 70% respecto a otras zonas del pavimento.

Como se mencionó en el apartado de Generalidades del Capítulo 1, los vehículos vibrarán al circular por los caminos, producto de las ondulaciones y defectos presentes en la zona de rodadura. Como se indicó, esto da lugar a que varíen las fuerzas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos, las cuales están compuestas por una magnitud estática y otra magnitud dinámica. De acuerdo a los estudios realizados, las componentes dinámicas serían mayores en determinados segmentos del pavimento, con una magnitud semejante para todos los vehículos, al circular a velocidades próximas y presentar pesos vehiculares cercanos.

Al respecto, el reporte más reciente sobre estos fenómenos fue elaborado Romero y Lozano (2006), el cual sugiere que como una función de las características de rigidez y amortiguamiento de los componentes de los vehículos, las porciones del pavimento más severamente afectadas por los vehículos sufrirían un daño mayor, del orden de 30% respecto al efecto promedio producido a lo largo del camino.

Esta falta de uniformidad de los efectos de los vehículos sobre los pavimentos ha llegado a verificarse experimentalmente (Cebon, 1999), por lo que existe una discusión sobre los niveles de daño en las partes más esforzadas o vulnerables.

2.4.6 Efecto de la carga transportada sobre el daño de los pavimentos

El efecto de la carga transportada sobre el daño de los pavimentos se desglosa en dos aspectos. Por un lado se tiene la magnitud de la carga, que implica variaciones en los niveles de las fuerzas estáticas ejercidas por los vehículos sobre los pavimentos. Por otro lado, se tienen las características de dicha carga, que potencialmente podrían influir sobre el daño de estas infraestructuras.

En cuanto a la magnitud de la carga transportada, ésta influye de manera básica en el daño causado por los vehículos sobre el pavimento y, por lo tanto, ha sido la principal característica a controlar por parte de las autoridades. De manera sobresaliente, a principios de los años sesentas se realizó un experimento para determinar el efecto del nivel de carga sobre el daño potencial de los pavimentos. Dicho esfuerzo experimental, fue coordinado por la AASHTO (en ese entonces AASHO: *American Association of State Highway Officials*). Como resultado de este experimento o “Prueba AASHO”, se identificó la “Ley de la Cuarta Potencia”, como se describió en el apartado de Generalidades del Capítulo 1. Posteriormente a este

importante esfuerzo por caracterizar el efecto del peso sobre el daño de los pavimentos, se han reportado pocas investigaciones de manera especializada. Al respecto, Romero y Lozano (2006) predijeron una relación cuadrática entre el nivel de carga y el daño del pavimento, lo cual correlaciona de manera notable con los resultados experimentales de la “Prueba ASSHO”.

Por el lado del efecto del tipo de carga sobre el daño de los pavimentos, éste se relaciona con el movimiento de la carga sobre el vehículo, el cual podría dar lugar a variaciones en los niveles de las fuerzas de las llantas a ambos costados del pavimento. Sin embargo, son contados los estudios que directamente se enfocan en este asunto (Ibrahim, 2004). Ello a pesar de los múltiples indicios de que el movimiento de la carga sobre el vehículo, implica variaciones en las fuerzas ejercidas por los vehículos sobre los pavimentos, lo que afecta su estabilidad lateral e incluso la eficiencia de frenado (Wasfy *et al.*, 2008; Pape *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2007; Modaresi-Tehrani *et al.*, 2006; Billing y Patten, 2005; Fu y Cebon, 2002).

De esta forma, la oscilación de las cargas podría afectar la magnitud de las fuerzas en las llantas de los vehículos y, por ende, influir en el daño de los pavimentos (Romero *et al.*, 2007; Ibrahim, 2004). A este respecto, Kang *et al.* (2000) analizaron el efecto del oleaje de una carga líquida en el interior de los contenedores de transporte. Reportaron que el movimiento cuasi-estático del líquido transportado, al maniobrar un cambio de dirección del vehículo, provoca cambios en la transferencia lateral de carga (Coeficiente de Transferencia Lateral de Carga, CTLC) desde 0.32 hasta 0.39. Para esta variación y de acuerdo al criterio de la cuarta potencia, implicaría un incremento localizado del daño del pavimento en 21% (Potter *et al.*, 1993). En este mismo sentido, simulaciones realizadas por Romero *et al.* (2007) denotan importantes variaciones de las fuerzas sobre los pavimentos, producto del movimiento de las cargas líquidas. Para una maniobra en curva, en la que la velocidad del autotank se incrementa gradualmente, una carga inmóvil representaría valores de la transferencia lateral de carga del orden de 0.3, la cual se incrementaría hasta 0.47 y 0.36 para niveles de llenado de 90 y 50% respectivamente.

Sin embargo, Ibrahim (2004) reportó un efecto mixto del oleaje de la carga sobre los niveles de las fuerzas de las llantas sobre el pavimento. Para un nivel de llenado de 50%, este investigador encuentra que el movimiento del fluido actúa como un amortiguador dinámico, lo que reduce hasta en 50% los valores de las cargas sobre el pavimento. Por el contrario, para niveles de llenado de alrededor de 75%, las fuerzas

sobre el pavimento se incrementarían hasta en 70%. En este mismo sentido, Romero *et al.* (2007) reportaron mediciones experimentales comparativas entre las respuestas de una carga líquida y otra sólida, sometidas a perturbaciones laterales. Los resultados, en este caso, coinciden en general con los reportados por el Profesor Ibrahim.

La Figura 2-7 muestra algunos resultados experimentales reportados por Romero *et al.* (2007), sobre el movimiento potencial de la carga y la magnitud del daño ocasionado en el pavimento, en términos de la “Ley de la Cuarta Potencia”. Estos resultados, muestran que el daño de los pavimentos es una clara función del nivel de llenado y del tipo de carga transportada (aquella que presenta oleaje (líquida) y aquella que no lo presenta). En particular, para el nivel de llenado de 75% existen las mayores diferencias entre ambos tipos de carga. Al respecto, se tiene que la carga líquida causa hasta 50% más daño en los pavimentos considerados. De esta forma, la relación se invierte para los mayores niveles de llenado, en donde la carga que no hace olas es más agresiva para con el pavimento.

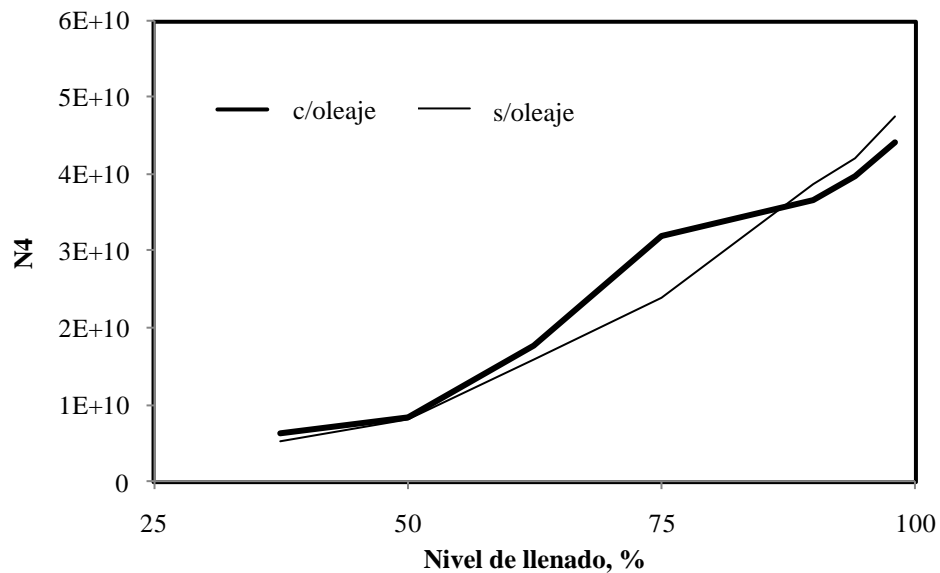


Figura 2-7: Efecto del tipo de carga sobre el daño potencial de los pavimentos (Romero *et al.*, 2007).

Ante la perspectiva del incremento de costos para mantener a la infraestructura carretera en niveles aceptables de uso (las cuales guardan una relación con el uso económico de las carreteras), los gobiernos y los administradores de los caminos han fomentado el desarrollo de tecnologías confiables para mantener un control sobre las cargas que los vehículos ejercen sobre los pavimentos. Estos esfuerzos se iniciaron

con dispositivos estáticos para el pesaje de los vehículos que circulan por las carreteras y, en la actualidad, se está migrando a tecnologías de pesaje en movimiento (Kistler, 2007; Hussain y Parker, 2006; Papagiannakis *et al.*, 2006; Straus y Semmens, 2006; Martin *et al.*, 2003).

La Figura 2-8 muestra una estación de pesaje estático, instalada sobre la carretera 57 México-Querétaro, en Calamanda, Querétaro.

Por otro lado, la Figura 2-9 muestra una aproximación local para un dispositivo portátil para el pesaje en movimiento de los vehículos pesados, basado en principios de hidrostática (Romero y Lozano, 2008).

De esta forma, si bien existen muchos avances alrededor del estudio de la magnitud del peso de los vehículos sobre el daño de los pavimentos, es posible observar algunas carencias al no existir muchas publicaciones recientes sobre este tema.



Figura 2-8: Vista de la aproximación a la estación de pesaje de Calamanda, sobre la carretera 57 México-Querétaro.



Figura 2-9: Sensor hidrostático ensayado en México (Romero y Lozano, 2008).

2.4.7 Efecto de los pares de tracción sobre el daño de los pavimentos

Para que un vehículo pueda desplazarse, necesita ejercer una fuerza de tracción sobre la superficie del pavimento a través de las llantas. Esta fuerza se genera por medio del par transmitido del motor del vehículo a través de los ejes motrices. Sin embargo, la fuerza de tracción ocasiona esfuerzos cortantes sobre los elementos asfálticos que constituyen el pavimento. De esta forma, mientras el vehículo se desplaza daña el pavimento.

No obstante, en la actualidad no existe un reporte que cuantifique el grado de influencia de estas fuerzas sobre el daño de los pavimentos, como una función de los factores asociados al vehículo, pavimento y condiciones ambientales.

Sin embargo, este efecto podría ser relevante al considerar los importantes montos invertidos en el mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura carretera (ver punto 2.1), así como el volumen de

carga transportada hoy en día. Esto es, se pronostica que el movimiento doméstico de carga en México por carretera fue de aproximadamente 214 mil millones de Ton-km en 2008, lo que representa un incremento de 2% con respecto al 2006 (IMT, 2007). De esta forma, bajo este contexto es presumible la importancia de este efecto en el estudio de la interacción masiva de los vehículos pesados con el pavimento.

2.4.8 El nivel de la rugosidad en los pavimentos y la seguridad carretera

El efecto producto del estado de las infraestructuras sobre la cantidad y gravedad de los accidentes, se ha reconocido desde mucho tiempo atrás. Sin embargo, es difícil obtener información objetiva al respecto.

No obstante, el estado de la rugosidad de los pavimentos podría ser uno de los principales factores que influye en la ocurrencia de accidentes. Este hecho se puede analizar desde una perspectiva de corto plazo y otra de largo plazo.

Una perspectiva de corto plazo, sería el hecho de que un accidente ocurriera debido a alguna maniobra evasiva, esto es, para evitar algún desperfecto en la carretera. Otra situación, en este mismo sentido, sería un pavimento deteriorado en extremo, con roderas que afectarían la estabilidad y facilidad de manejo del vehículo. Sin embargo, los efectos inmediatos del nivel de rugosidad de la carretera sobre la ocurrencia de accidentes no han sido incluidos, en general, en los análisis de accidentes (Davis *et al.*, 2005; CARE, 2004).

A largo plazo, los accidentes ocasionados por la falla de algunos componentes del vehículo podrían estar asociados al nivel de rugosidad del pavimento, aunque esto es difícil de cuantificar y por consiguiente no existen reportes sobre este aspecto.

2.5 Comparación de las medidas de desempeño del pavimento

Dada la importancia económica en torno a la interacción vehículo pesado-pavimento, en la actualidad se han desarrollado diversas medidas que permiten predecir el desempeño del pavimento, las cuales son utilizadas, como se ha discutido hasta ahora, en diferentes aplicaciones que van desde estudios que tratan

de medir el grado de agresividad de los componentes de los vehículos para con el pavimento, hasta esquemas de asignación de costos “inteligentes” que tratan de establecer tarifas en función del daño que ocasionan los vehículos.

Estas medidas pueden ser clasificadas en: (i) modelos empíricos, que relacionan los cambios en las condiciones del pavimento con variables físicas, tales como la carga del tráfico, factores climáticos, espesores de capa o propiedades de los materiales; (ii) modelos mecanicistas, que se basan en los principios de mecánica de materiales y utilizan como datos de entrada la carga que ejercen las llantas de los vehículos para predecir la respuesta del pavimento en función de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones; y (iii) modelos empírico-mecanicistas, los cuales utilizan modelos mecanicistas basados en pruebas de laboratorio y cuyos resultados se correlacionan con los datos del desempeño del pavimento obtenidos en campo a través de coeficientes de calibración empíricos (Kim *et al.*, 2005; Huang, 2004). De estos tres grupos, los modelos empírico-mecanicistas son considerados como las medidas de desempeño que pueden predecir de forma más realista el daño del pavimento, ya que combinan las ventajas de los modelos empíricos y los mecanicistas (Luo, 2005).

Dentro de los modelos empíricos y empírico-mecanicistas, Romero *et al.* (2009) llevaron a cabo una comparación de diversas medidas de desempeño reportadas en la literatura, con el objeto de evaluar el efecto de la rugosidad del pavimento, la velocidad de los vehículos y la variación de la temperatura sobre el daño potencial del pavimento. Estos parámetros, fueron seleccionados con base en el efecto que los vehículos tienen sobre el pavimento, como una función de las propiedades del vehículo, pavimento y condiciones de operación.

En esta evaluación, se utilizaron 570 perfiles de pavimento y un modelo de vehículo pesado de dos ejes, a efecto de simular las fuerzas que los vehículos ejercen sobre el pavimento, además de considerar una variación sinusoidal de la temperatura. Las medidas de desempeño estuvieron conformadas por: (i) coeficiente de carga dinámica (*Dynamic Load Coefficient*, DLC), (ii) criterio de fuerza agregado (*Aggregate force criteria*), (iii) factor de esfuerzo en el camino (*Road Stress Factor*, RSF), (iv) factor de impacto del 95 percentil (*95th percentile Impact Factor*, IF_{95}^{th}), (v) factor de esfuerzo en el camino del 95 percentil (*95th percentile Road Stress Factor*, RSF_{95} , Φ_{95}^{th}), (vi) criterio de la cuarta potencia (*4th Power force criterion*, POW), y (vii) energía almacenada (*Stored energy*).

El estudio mostró que el modelo empírico-mecanicista de la energía almacenada (también llamado enfoque energético), es el único que considera la respuesta dinámica del pavimento. A su vez, con los datos obtenidos producto de las simulaciones, se pudo concluir que la energía almacenada exhibe la mayor sensibilidad realista al efecto producto del tiempo de aplicación de la carga y la temperatura sobre el daño potencial del pavimento, lo cual ninguna de las otras medidas de desempeño fue capaz de evaluar. Al respecto, los resultados predijeron que: (i) un incremento de 80% en la velocidad del vehículo, representaría un decremento de 14% en el daño potencial del pavimento; y (ii) un incremento de 7% en la temperatura, implicaría un incremento de 570% en el daño potencial del pavimento (Romero *et al.*, 2009).

2.6 Discusión

A la luz de esta exposición, es posible identificar una serie de limitaciones en los enfoques y herramientas para el análisis de la interacción vehículo pesado-pavimento. De esta forma, se ha puesto de manifiesto la carencia de una normatividad objetiva y eficiente a nivel nacional, así como de severas limitaciones en los cargos por uso de infraestructura implementados y propuestos en la actualidad. Por lo cual, se requiere contar con alguna medida de desempeño objetiva, para evaluar el efecto potencial de los vehículos pesados sobre el pavimento.

A este respecto, se han identificado dos vertientes polarizadas en torno a las medidas de desempeño reportadas en la literatura. Por un lado, se tienen aquellas que consideran de manera exclusiva las fuerzas de los vehículos y, por lo tanto, desprecian la respuesta del pavimento a estas cargas. Por otro lado, se tienen los modelos de predicción del desempeño de los pavimentos a largo plazo, que consideran tanto la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento, como la respuesta del pavimento a las cargas de los vehículos. Sin embargo, estos últimos cuentan con reconocidas restricciones computacionales que impiden su implementación.

De forma intermedia entre estas dos aproximaciones, se ha identificado una medida de desempeño del pavimento denominada enfoque energético, la cual fue desarrollada en México por Romero y Lozano (2006). Este enfoque permite la simulación masiva de los vehículos pesados al circular por longitudes reales de pavimento, además de considerar tanto la respuesta de los vehículos al perfil del pavimento

como la respuesta del pavimento a las cargas de los vehículos, para lo cual requiere medios computacionales convencionales. Adicionalmente, cabe señalar que al comparar este enfoque con las diversas medidas reportadas en la literatura, muestra la mayor sensibilidad realista al tiempo de aplicación de la carga y a la temperatura del pavimento. Estas variables se han destacado a lo largo del Capítulo 1 y 2 como relevantes en el estudio del daño de los pavimentos flexibles y cuyos efectos combinados se presentan en los tráficos medidos en México.

Sin embargo, la formulación de este enfoque no toma en cuenta algunos efectos que podrían ser relevantes en torno a los importantes montos invertidos en el mantenimiento de la infraestructura carretera y la interacción masiva del tráfico mixto de vehículos pesados con el pavimento. En particular, tales efectos se refieren a los pares de tracción ejercidos en la interfaz llanta-pavimento. A este respecto, dadas las ventajas señaladas anteriormente, en esta tesis se parte del enfoque energético, al que se le incorpora el concepto de la energía de deformación asociada a los pares de tracción de los vehículos pesados ejercidos sobre el pavimento. Los principales aspectos en torno a este enfoque, así como el desarrollo de una formulación original que permite cuantificar el efecto de los pares de tracción, son presentados en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Simulación de la interacción vehículo – pavimento

La simulación constituye la puesta en marcha de un modelo y puede tener diversas naturalezas, que incluyen a los modelos analógicos, matemáticos y a escala. En este capítulo, se revisa el modelo matemático desarrollado por Romero y Lozano (2006) de la interacción dinámica de los vehículos con el pavimento, al cual se le incorporan algunos efectos deseables de ser considerados tal y como se discutió en el capítulo anterior. Tales efectos, corresponden a los pares de tracción de los ejes motrices de los vehículos pesados que actúan en la interfaz llanta-pavimento, como una función de diversas propiedades del vehículo y del pavimento, así como de las condiciones de operación, las cuales incluyen la velocidad de aplicación de la carga y la temperatura del pavimento.

Las partes del modelo, denominado enfoque energético, que son modificadas para considerar el efecto de los pares de tracción, corresponden tanto al modelo del pavimento, el cual es discretizado en elementos asfálticos de área constante, así como los diagramas de fuerza de los vehículos, los cuales son desarrollados y utilizados para obtener la formulación que permite calcular la energía de deformación asociada a la fuerza de tracción de las llantas sobre el pavimento.

De esta forma, el contenido de este capítulo queda comprendido por cuatro partes. En la primera, se describe de forma general el enfoque energético a la deformación del pavimento. Esta descripción incluye tanto los modelos de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, así como el modelo del pavimento. La segunda parte, presenta los diagramas de fuerza que consideran las fuerzas de tracción y de resistencia al desplazamiento de los vehículos, así como el modelo de pavimento discreto que incorpora, de igual manera, la fuerza de tracción en la interfaz llanta-pavimento. Posteriormente, se

desarrolla la formulación que permite calcular el efecto de estas fuerzas, en función de la cantidad de energía almacenada en el pavimento. En la tercera parte, se muestran los resultados y conclusiones obtenidos de los diversos análisis paramétricos que son realizados al aplicar el modelo modificado resultante, esto es, una vez incorporado el efecto de los pares de tracción dentro del enfoque energético. Finalmente, se lleva a cabo la discusión de las principales conclusiones producto de tales análisis.

3.1 Enfoque energético

En este punto, se describe de forma general el enfoque energético utilizado en el estudio de la interacción vehículo-pavimento. En esta descripción se incluyen los modelos de los vehículos y pavimentos empleados, además del parámetro de desempeño, que es identificado en la energía de deformación que transitoriamente se almacena en los elementos asfálticos que integran el modelo de pavimento, producto del paso de los vehículos. Esta energía se traduce como daño potencial del pavimento. De igual manera, se presenta la validación de este enfoque, además de mencionar de forma general sus aplicaciones.

3.1.1 Modelado de vehículos

La Figura 3-1 ilustra los vehículos que mayormente transitan por las carreteras de México y el mundo, los cuales se componen de vehículos unitarios (no-articulados) y articulados. En esta descripción, se emplea la nomenclatura oficial vigente en México para designar a los vehículos pesados (SCT, 2008). De acuerdo con esta nomenclatura, un camión unitario se denota por la letra C, seguida por un número que representa la cantidad de ejes del vehículo (2 ó 3). En el caso de los vehículos articulados, las letras se refieren al tractor (T) y al semirremolque (S), seguidas también por el número de ejes con que cuentan (T3-S2 y T3-S3). Una combinación empleada tan solo marginalmente en México corresponde a la T2-S1, por lo cual no será empleada en este trabajo.

Para el modelado de los vehículos, éstos se asumen que están compuestos de masas rígidas acopladas por elementos flexibles y amortiguadores carentes de masa, lo cual es aceptable en términos generales (Collop *et al.*, 1996; Hsu *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1992). De esta forma, los distintos vehículos representados esquemáticamente en la Figura 3-1 poseen diferentes grados de libertad.

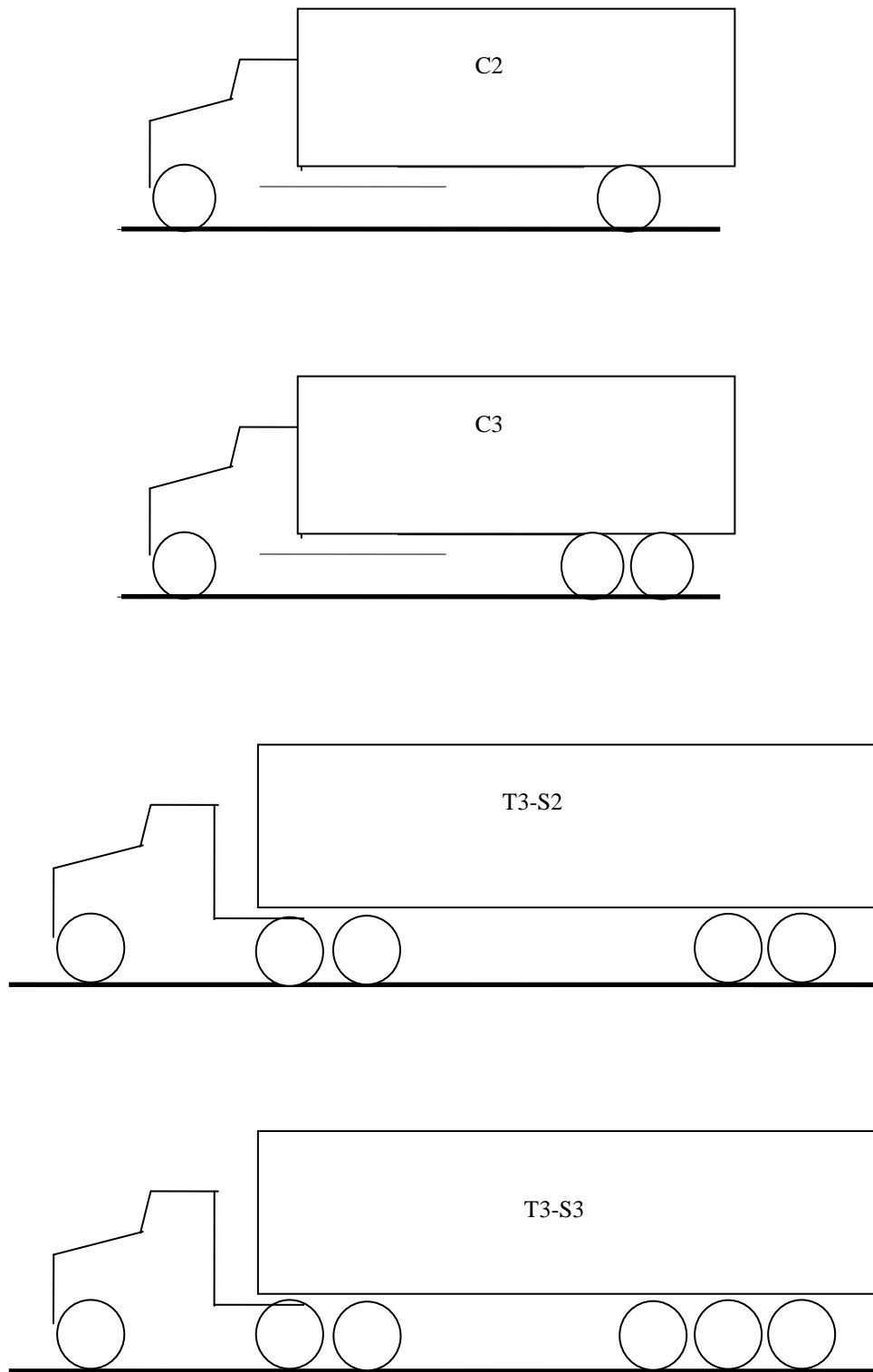


Figura 3-1: Vehículos considerados en la simulación de la interacción vehículo pesado-pavimento (Romero y Lozano, 2006).

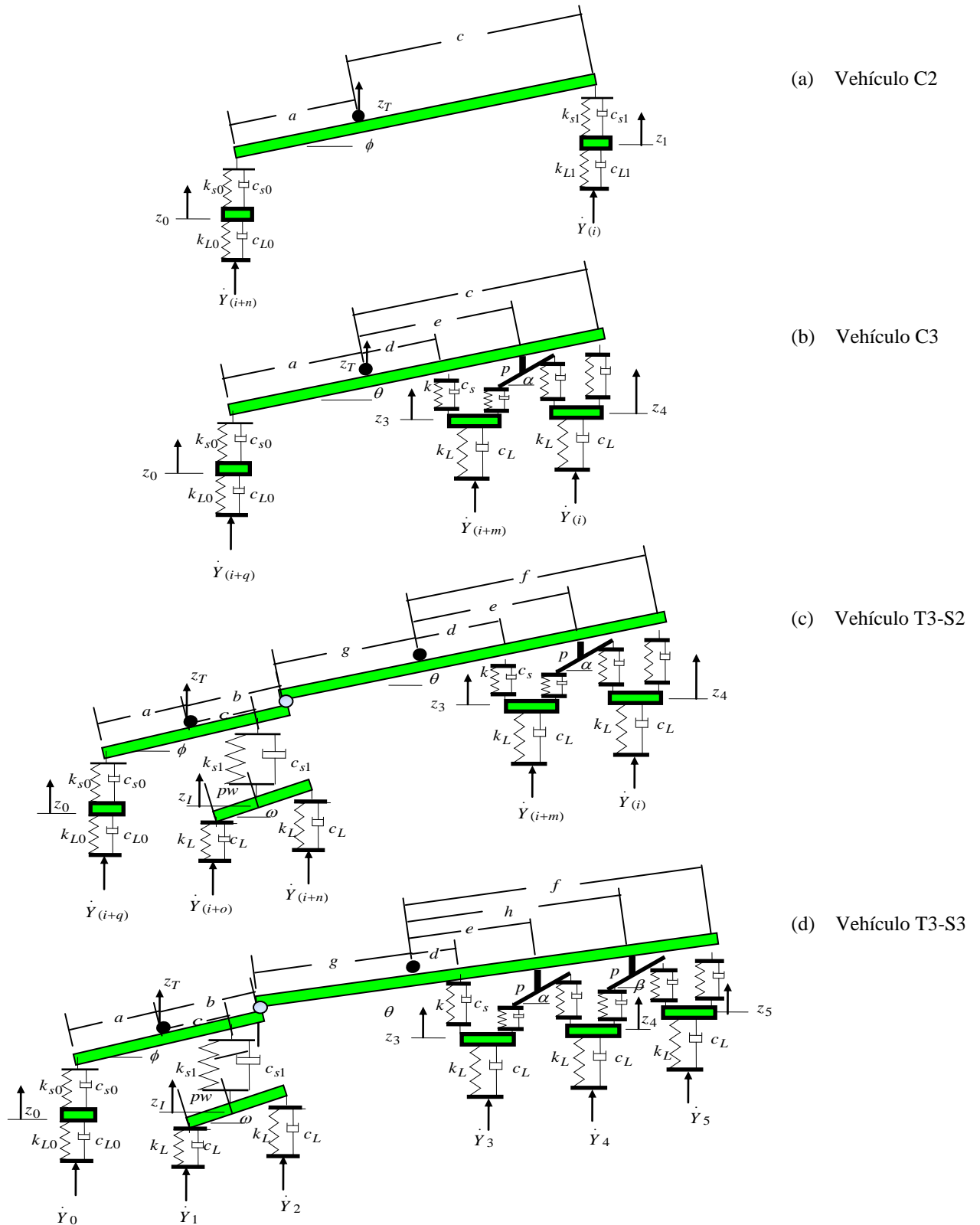


Figura 3-2: Modelos discretos compuestos de masas rígidas acopladas por elementos flexibles y amortiguadores carentes de masa, correspondientes a los vehículos tipo: (a) C2; (b) C3; (c) T3-S2; y (d) T3-S3 (Romero, 2000).

Tales grados de libertad se identifican al discretizar las masas del vehículo, como se muestra en la Figura 3-2 para el caso de los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 (Romero, 2000).

A manera de ejemplo, el siguiente párrafo resume la descripción de los componentes que integran uno de los modelos de los vehículos discretos, esto es, el que corresponde al vehículo tipo T3-S2.

Las constantes k y c representan, respectivamente, las propiedades de rigidez y de amortiguamiento de las suspensiones de los diferentes ejes, designados con diversos subíndices de acuerdo al eje ($s0$: eje delantero; $s1$: ejes de la suspensión de los ejes motrices; sin subíndice en el caso de la suspensión del semirremolque). Las distancias acotadas en el diagrama influyen en la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, al definir los diferentes momentos de inercia involucrados. Los nueve grados de libertad del T3-S2 quedan definidos por las posiciones de las masas de los ejes del vehículo: z_0 para el eje direccional; z_3 y z_4 para los ejes delantero y posterior del semirremolque, respectivamente. Asimismo, dos grados de libertad corresponden a la viga de la suspensión del balancín del tractor (z_I para la posición vertical, ω para la posición angular) y para el balancín en el semirremolque (α). Los otros tres grados de libertad de esta combinación vehicular, quedan compuestos por las posiciones vertical y angular de la masa suspendida del tractor (z_T y ϕ , respectivamente) y el ángulo del semirremolque (θ).

La descripción de los modelos de los vehículos tipo C2, C3 y T3-S3, ha sido presentada anteriormente por los autores (Romero y Lozano, 2006; Romero, 2000), por lo tanto, no será repetida en esta tesis. Únicamente, como resumen, se mencionan los diferentes grados de libertad correspondientes a los cuatro vehículos modelados, los cuales quedan de la siguiente manera: C2 con 4; C3 con 6; T3-S2 con 9; y T3-S3 con 11.

De igual manera, tampoco se incluye el desarrollo de los diagramas de cuerpo libre y las ecuaciones de movimiento para los vehículos modelados, así como el método de solución de las ecuaciones de movimiento resultantes, debido a que han sido reportados anteriormente (Romero y Lozano, 2006; Romero, 2000). A su vez, tampoco se repite el extenso desarrollo algebraico entre la aplicación de la Segunda Ley de Newton a los diagramas de cuerpo libre, así como la expresión final de las ecuaciones de movimiento, ya que también han sido expuestos con anterioridad (Romero y Lozano, 1995).

3.1.2 Modelado de pavimentos

La Figura 3-3 muestra el modelo discreto del pavimento, empleado en el enfoque energético para el análisis del efecto de los vehículos sobre el pavimento (Romero y Lozano, 2006). Este modelo simplificado del pavimento, comprende una sola capa de elementos asfálticos desacoplados y soportados por un suelo rígido. Las propiedades de rigidez de estos elementos, se describen a través de formulaciones empíricas reportadas en la literatura (Collop, 1993). Este modelo representa algunas ventajas respecto a otros modelos existentes, al permitir la modelación de la interacción vehículo-pavimento basada en la respuesta dinámica del pavimento.

La respuesta dinámica diferente de los elementos asfálticos a las cargas de los vehículos, se da a partir de las propiedades de rigidez del pavimento, como una función de las propiedades de la mezcla asfáltica, del aglomerante asfáltico y de las condiciones de aplicación de la carga (velocidad de la carga y temperatura del pavimento).

El módulo de rigidez de la mezcla asfáltica E_D , se obtiene de la siguiente expresión (Collop y Cebon, 1993):

$$E_D = E_b [1 + (257.5 - 2.5 \cdot VMA) / n(VMA - 3)]^n, \quad (3.1)$$

donde : E_b = Módulo de rigidez del aglutinante (MPa),

$$n = 0.83 \log[(4 \cdot 10^4) / E_b], \text{ y}$$

VMA = Porcentaje de huecos en el material mezclado.

Esta ecuación es válida para cuando $12\% < VMA < 30\%$, además de que E_b sea mayor de 5 MPa.

El módulo de rigidez del aglutinante E_b , se expresa por la siguiente ecuación empírica (Collop y Cebon, 1993):

$$E_b = 1.157 \cdot 10^{-7} \cdot t_l^{-0.368} \cdot 2.718^{-PI^{(R)}} \left(T_{RB}^{(R)} - T_{asp} \right)^5, \quad (3.2)$$

donde : $T_{RB}^{(R)}$ = Temperatura de suavización del asfalto recuperado (TRB) ($^{\circ}C$),

T_{asp} = Temperatura de la muestra de asfalto ($^{\circ}C$),

$PI^{(R)}$ = Índice de penetración del asfalto recuperado (viscosidad) ($^{\circ}C$), y
 t_l = Tiempo de aplicación de la carga (s).

Esta ecuación es válida para cuando:

$$0.01\text{seg} < t_l < 0.1\text{seg}$$

$$-1 < PI^{(R)} < 1.0$$

$$20^{\circ}C < (T_{RB}^{(R)} - T_{asp}) < 60$$

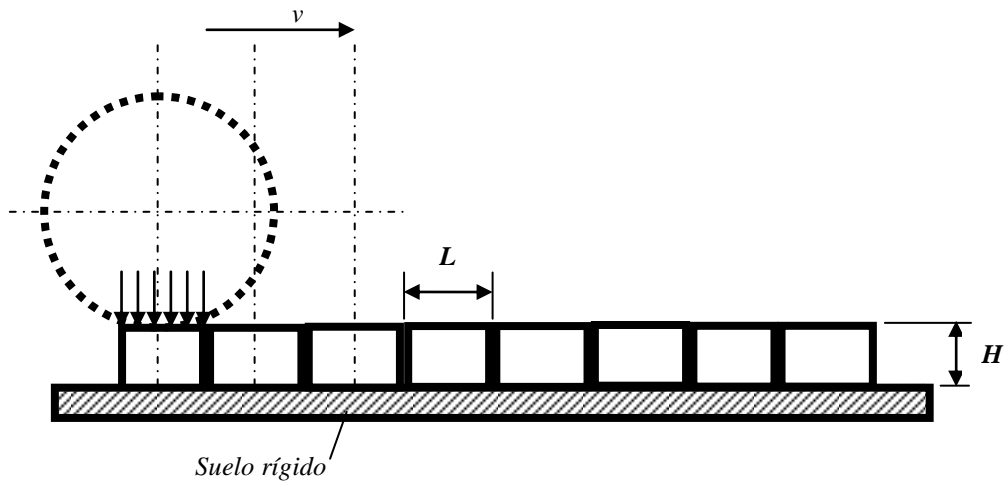


Figura 3-3: Modelo discreto de elementos asfálticos no acoplados del pavimento (Romero y Lozano, 2006).

La implementación de este modelo en una plataforma computacional considera algunas simplificaciones, como la relacionada con el posicionamiento de la llanta del vehículo sobre un solo elemento de pavimento a la vez. Esto es, el periodo de evaluación de los cálculos se adapta a la velocidad de tránsito del vehículo, para lo cual se asume una longitud L constante de los elementos de pavimento.

Aunada a la formulación de la respuesta de los pavimentos asfálticos a las cargas de los vehículos, así como a la modelación de la respuesta dinámica de los vehículos al perfil del pavimento, se propone un parámetro de desempeño que toma en cuenta ambas respuestas (pavimento y vehículo). Esta variable física se identifica en la energía de deformación E_A , que transitoriamente se almacena en el pavimento al paso de los vehículos, la cual asume una respuesta elástica del material de la siguiente manera (Romero y Lozano, 2006):

$$E_A = \frac{\sigma^2}{E_D}, \quad (3.3)$$

donde el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica E_D , está dado por la ecuación (3.1). σ es el esfuerzo aplicado por la llanta en el elemento considerado. Este modelo asume propiedades determinadas para la altura H y el área A de contacto entre la llanta y los elementos asfálticos mostrados en la Figura 3-3.

3.1.3 Validación del enfoque energético

Como ha sido mencionado, el enfoque energético utiliza a la energía de deformación como variable para cuantificar el daño del pavimento. Esta energía es la que se almacena transitoriamente en los elementos asfálticos que integran el pavimento, en el momento en que las llantas de los vehículos ejercen una fuerza. De esta forma, esta energía puede relacionarse con la deformación plástica en el pavimento a través de la Ley de Hooke, expresada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (3.4)$$

donde: ε es la deformación unitaria (Pa/Pa),

σ es el esfuerzo aplicado (Pa), y

E es el módulo de rigidez dinámico del material (Pa).

Con base en esta relación (energía – deformación), la validación del enfoque energético se llevó a cabo por medio de los resultados de la “Prueba AASHO”, de la forma como fueron reportados por Carpenter (1992). Esto a través de la generación de “roderas” en el pavimento, como una función de determinado número de ciclos de aplicación de carga con magnitud constante. De esta forma, la mecánica de validación consistió en calibrar una de las curvas de deterioro para cierto nivel de carga, para posteriormente predecir las otras curvas a diferentes valores. Los resultados mostraron coeficientes de correlación dentro del rango de 0.9 (Romero, 2000; Romero y Lozano, 2000B). A este respecto, la Figura 3-4 muestra la comparación de los resultados de la “Prueba AASHO” con el enfoque energético, correspondiente a las cargas de 8.1, 10.1 y 13.6 Ton para ejes sencillos.

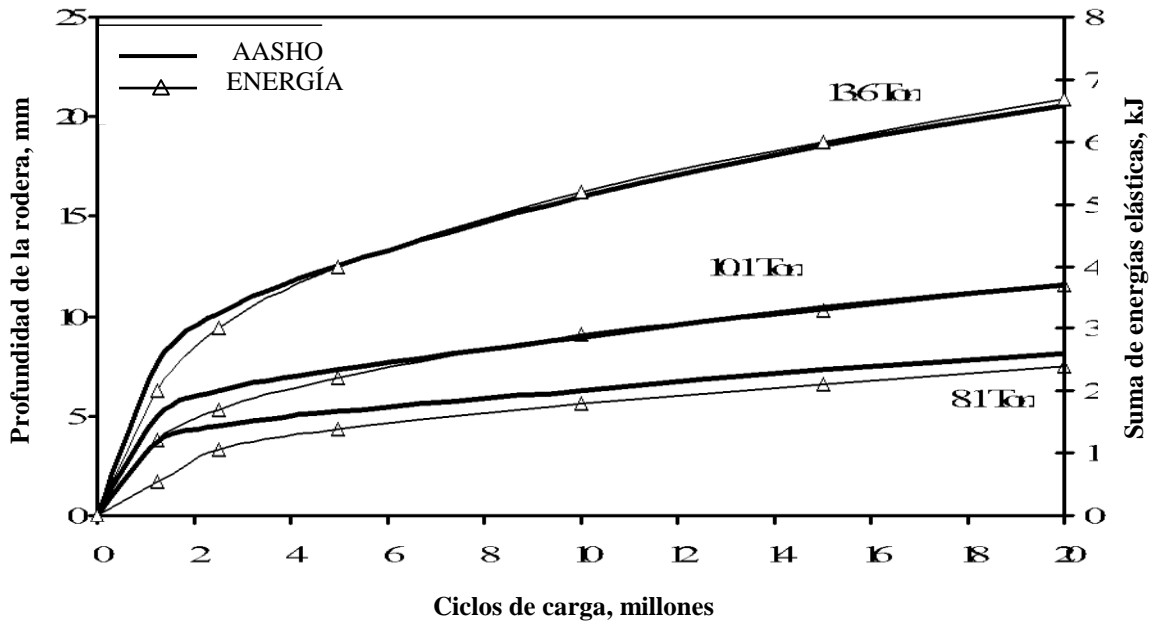


Figura 3-4: Suma de energías almacenadas transitoriamente en el pavimento para el paso de ejes sencillos, comparadas con los resultados empíricos obtenidos de la “Prueba AASHO” bajo diferentes niveles de carga (Romero, 2000).

3.1.4 Aplicaciones del enfoque energético

El enfoque energético ha sido utilizado en diferentes aplicaciones (Romero *et al.*, 2006; Romero y Lozano, 2006; Romero y Lozano, 2000A, 200B). Tales aplicaciones, incluyen desde el estudio de la distribución espacial del daño potencial de los vehículos sobre los pavimentos hasta una propuesta de cuotas de peaje flexibles, como una función del ambiente y de las condiciones de carga de los vehículos, como fueron descritas en el capítulo anterior.

3.2 Efecto de los pares de tracción

En esta sección se describe el desarrollo de una formulación original, que permite incorporar el efecto de los pares de tracción dentro del enfoque energético, el cual ha sido descrito en el punto anterior. De esta forma, se presentan los modelos de los vehículos y pavimentos desarrollados para considerar este efecto, así como el esquema de la simulación del paso de los vehículos pesados sobre el pavimento, el cual es utilizado para obtener el agregado de las energías almacenadas y su distribución sobre el pavimento.

3.2.1 Modelado de vehículos

A manera de ejemplo, la Figura 3-5 muestra la representación esquemática del vehículo tipo C2 junto con el sistema de tracción empleado. Este sistema, presenta una serie de componentes que permiten el movimiento del vehículo a través de la fuerza de tracción o motriz, ejercida entre la llanta y la superficie del pavimento. Esta fuerza permite desplazar al vehículo bajo diferentes regímenes de operación, los cuales son divididos en: (i) estado permanente, en el que el vehículo mantiene una velocidad constante; y (ii) en estado transitorio, en el que la velocidad del vehículo varía.

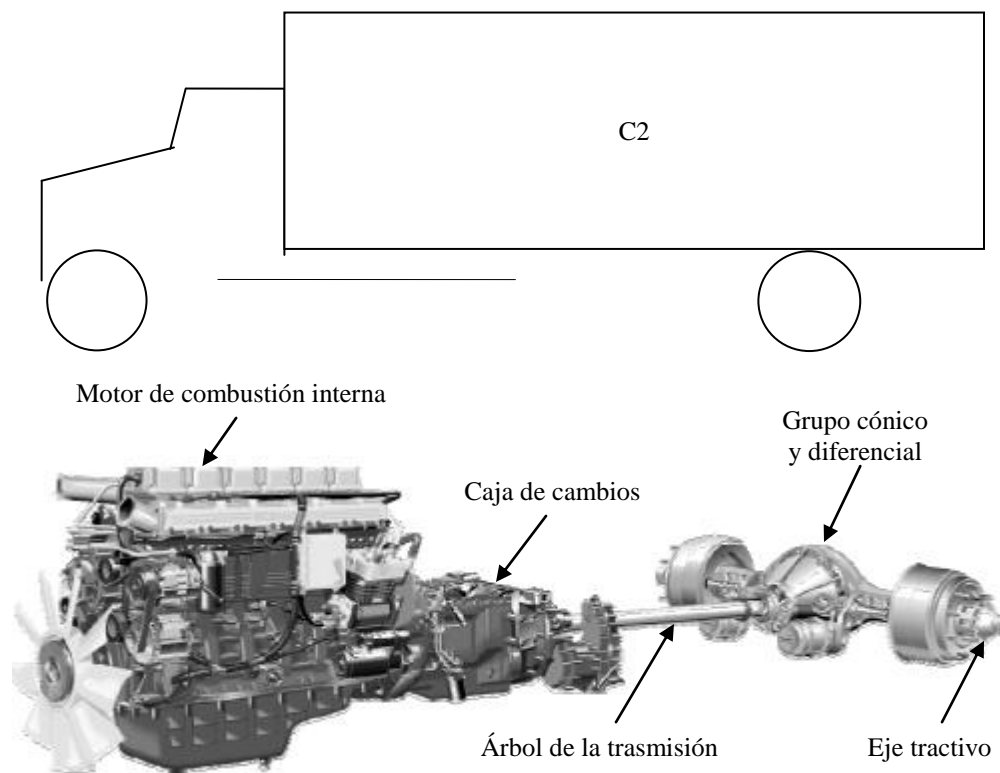


Figura 3-5: Sistema de tracción correspondiente a un vehículo tipo C2 (adaptado de Wideberg, 2007).

En estado permanente, las fuerzas que el vehículo requiere vencer para efectuar el movimiento consisten de (Rakha *et al.*, 2001):

- Arrastre del aire;
- Resistencia a la rodadura; y
- Resistencia a la pendiente.

Para los vehículos considerados en esta tesis, la Figura 3-6 muestra los diagramas de fuerza en los que se observan las fuerzas motrices (F_m) de los ejes tractivos, así como las fuerzas de resistencia al desplazamiento (F_{rr} : resistencia a la rodadura; y F_v : resistencia por arrastre del aire).

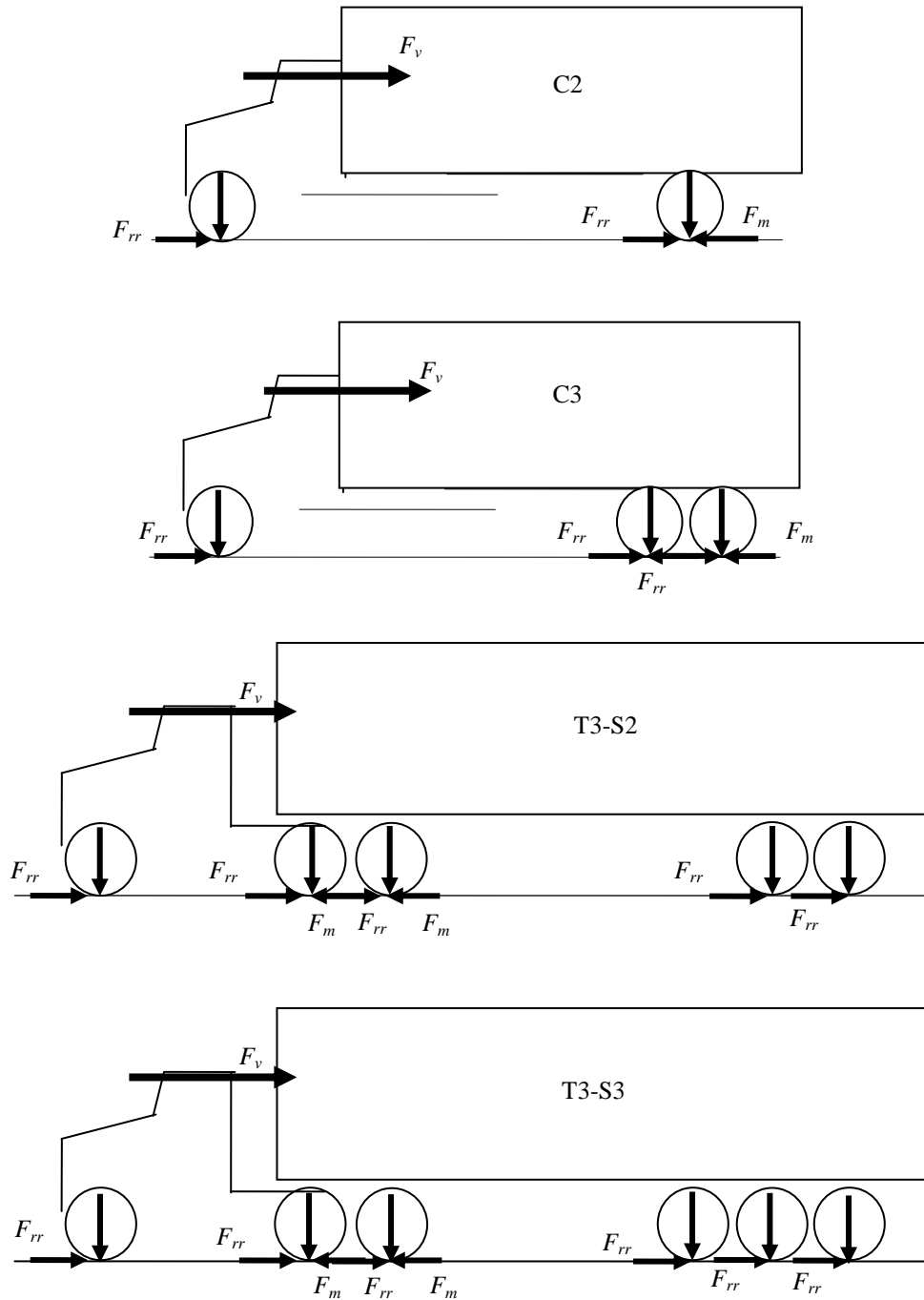


Figura 3-6: Fuerzas de tracción (F_m) y de resistencia al desplazamiento (F_{rr} : resistencia a la rodadura; y F_v : resistencia por arrastre del aire).

Adicionalmente, los camiones pueden tener dos tipos de frente, a saber: (i) el tradicional, como el que se ilustra en la Figura 3-6; y (ii) el de la cabina sobre el motor (COE), o chato. El efecto del tipo de frente del vehículo influye sobre la resistencia aerodinámica y en otros aspectos, tales como la visibilidad del conductor sobre el camino. Sin embargo, debido a que no se cuenta con las estadísticas con referencia a esta propiedad distintiva de los vehículos, todos los vehículos simulados en este trabajo se consideran con un frente tradicional.

3.2.2 Modelado de pavimentos

La Figura 3-7 muestra la representación discreta no-acoplada del pavimento, a la cual se le ha incorporado la fuerza de tracción de la llanta sobre el pavimento. Este modelo corresponde a una adaptación del mostrado en la Figura 3-3 y cuya descripción se presentó al inicio de este capítulo (ver punto 3.1.2).

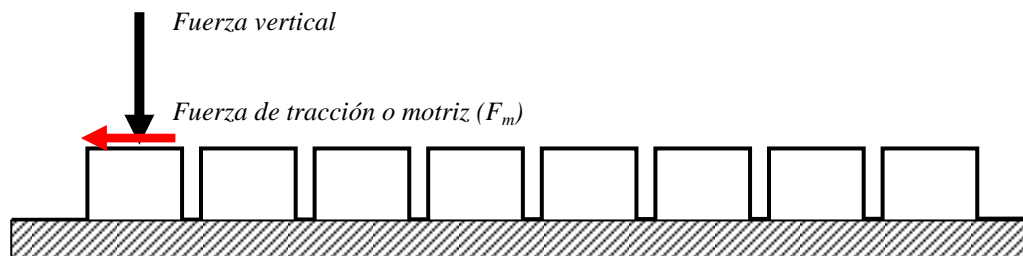


Figura 3-7: Modelo discreto de los elementos asfálticos no acoplados del pavimento, al que se le incorpora la fuerza de tracción motriz de las llantas (adaptado de Romero y Lozano, 2006).

La Figura 3-8 muestra la combinación de las deformaciones, esto es, normales δ y tangenciales γ en uno de los elementos de asfalto mostrado en la figura anterior.

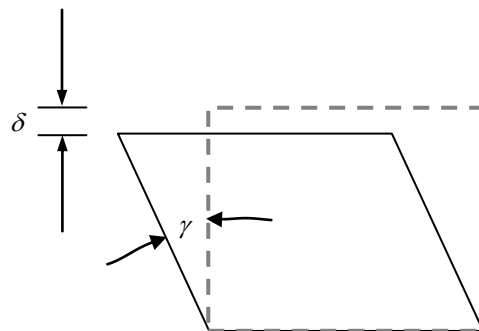


Figura 3-8: Deformaciones normales δ y tangenciales γ del elemento de asfalto.

La deformación normal, producto de la fuerza vertical de los vehículos, es calculada en función de la energía almacenada en los elementos asfálticos que componen el modelo del pavimento, a través de la ecuación (3.3). De igual manera, para evaluar el efecto de los pares de tracción sobre la deformación tangencial de estos elementos, se emplea este mismo parámetro de desempeño, es decir, la energía de deformación. Por lo cual, el efecto potencial dañino de los vehículos sobre los pavimentos quedará integrado por la suma de la energía normal (asociada a las fuerzas verticales) y la energía tangencial (asociada a las fuerzas de tracción). De esta forma, en el siguiente punto se describe el desarrollo de una formulación original que permite calcular el daño potencial de los pares de tracción, en función de la energía de deformación almacenada en el pavimento.

3.2.3 Formulación del efecto de los pares de tracción

Para el caso de los esfuerzos cortantes la energía de deformación está dada por (Popov, 1976):

$$U = \frac{1}{2G} \tau^2 \quad (3.5)$$

en donde τ es el esfuerzo cortante y G es el módulo de rigidez a torsión del elemento esforzado, dado por (Popov, 1976):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.6)$$

donde ν es la relación de Poisson y E es sustituido en este trabajo por E_D (ecuación 3.1). El esfuerzo cortante τ de la ecuación (3.5) está dado en función de la fuerza motriz y del área de contacto, de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{F_m}{A} \quad (3.7)$$

donde A es el área de contacto y F_m es la fuerza de tracción de la llanta sobre el pavimento. A su vez, esta fuerza tractiva resulta una función del par transmitido por el eje motriz M y por el radio r estimado de la llanta, de la siguiente manera:

$$F_m = \frac{M}{r} \quad (3.8)$$

Sin embargo, a velocidad constante, la fuerza F_m se iguala a la suma de la fuerza de resistencia del aire, o de arrastre F_v , y de la fuerza asociada a la resistencia a la rodadura F_{rr} en la interfaz llanta-pavimento como se mostró en la Figura 3.6.

En cuanto a la fuerza de resistencia del aire, o de arrastre, ésta se encuentra representada por la siguiente ecuación (Shames, 1967):

$$F_v = C_D A_p \frac{\rho}{2} V^2 \quad (3.9)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, A_p es el área proyectada en la dirección del flujo, V es la velocidad de la corriente libre y ρ es la densidad del fluido.

Por otro lado, la fuerza de resistencia a la rodadura se toma de la siguiente manera (adaptada de Rakha *et al.*, 2001):

$$F_{rr} = C_r (c_2 V_{kph} + c_3)(W)(0.001), \quad (3.10)$$

donde:

V_{kph} es la velocidad de desplazamiento del vehículo, en km/h;

W es el peso instantáneo del vehículo, como resultado de la vibración del mismo y de la carga estática transportada;

C_r es el coeficiente de rodadura, como una función del estado del pavimento (2.25 para pavimento asfáltico en regular estado); y

c_2 y c_3 son constantes de rodadura, como una función de la superficie y del tipo de llanta (0.0328 y 4.575, respectivamente para una llanta radial).

Al asumir el tránsito del vehículo sobre pavimentos horizontales, la fuerza total F_{rT} que el vehículo deberá vencer resulta igual a la suma de las fuerzas de arrastre aerodinámico y de aquellas de resistencia a la rodadura, de la siguiente manera:

$$F_{rT} = F_v + F_{rr} \quad (3.11)$$

Esta fuerza total F_{rT} de resistencia, se considera distribuida de manera uniforme en cada uno de los ejes tractivos, de la siguiente manera:

$$F_m = \frac{F_{rT}}{n} \quad (3.12)$$

donde n es el número de ejes tractivos.

De esta forma, la energía de deformación tangencial U asociada a la fuerza de tracción en cada eje (Figura 3-6), se obtiene mediante la combinación de las ecuaciones (3.11) a (3.5), como sigue:

$$U = \frac{1}{2G} \left(\frac{F_m}{A} \right)^2 = \frac{1}{2G} \left(\frac{(F_v + F_{rr})}{A} \right)^2$$

$$U = \frac{1}{2G} \left(\frac{\left(\left(C_D A_p \frac{\rho}{2} V^2 \right) + (WC_r (c_2 V_{kph} + c_3)) \right)}{A} \right)^2$$

$$U = \frac{1}{2G} \left(\frac{C_D A_p \rho V^2}{2A} + \frac{(WC_r (c_2 V_{kph} + c_3))}{A} \right)^2$$

ó:

$$U = \frac{1}{2GA^2} \left(\frac{C_D A_p \rho V^2}{2} + (WC_r (c_2 V_{kph} + c_3)) \right)^2 \quad (3.13)$$

Para propósitos de cálculo, algunas cantidades en la ecuación (3.13) se toman como constantes, las cuales corresponden a: el área proyectada A_p para todos los tipos de vehículos (10 m^2) (Rakha *et al.*, 2001); la densidad del aire ρ (0.124 kg/m^3); y el área A de contacto entre la llanta y el pavimento (0.043025 m^2)

(Romero, 2000). Asimismo, se toma un valor de 1 para el coeficiente de arrastre C_D (Rakha *et al.*, 2001). Al sustituir estos valores en la ecuación (3.13), se obtiene la siguiente expresión:

$$U = \frac{57.8}{G} \left(0.62 V^2 + \left(1.75 W \left(0.0328 V_{kph} + 4.575 \right) \right) \right)^2 \quad (3.14)$$

Esta expresión es empleada para el cálculo de la energía de deformación tangencial, que se almacena en los elementos asfálticos que integran el modelo del pavimento (Figura 3-7), producto de las fuerzas de los ejes tractivos de los vehículos (Figura 3-6). G se obtiene en función de las propiedades de elasticidad E_D de la mezcla asfáltica, para lo cual se asume una relación de Poisson de 0.44 (Long y Theyse, 2004).

3.2.4 Integración de la energía tangencial a la energía normal

La nueva formulación para estimar el efecto de los pares de tracción sobre el daño potencial del pavimento, es incorporada en la plataforma computacional existente, es decir, aquella correspondiente al enfoque energético. Esta incorporación es directa, por lo que el cálculo de la energía de deformación tangencial, obtenida por la ecuación (3.14), es efectuado de manera paralela y sumada a la energía de deformación normal, expresada por la ecuación (3.3).

De esta forma, el programa resultante permite la obtención de la distribución espacial de la energía de deformación a lo largo del perfil del pavimento, la cual incorpora ahora las energías producto de las deformaciones normales y angulares de los elementos del pavimento.

Este valor constituye un parámetro global del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento, el cual incluye tanto las fuerzas verticales aplicadas por los vehículos (Figura 3-2), así como las fuerzas de tracción producto de los ejes tractivos (Figura 3-6).

Por otro lado, se ha habilitado en el programa la formulación para obtener la cantidad de energía integral asociada al paso de cada uno de los vehículos simulados, como una función de diversas condiciones de entrada, como se muestra en la Figura 3-9.

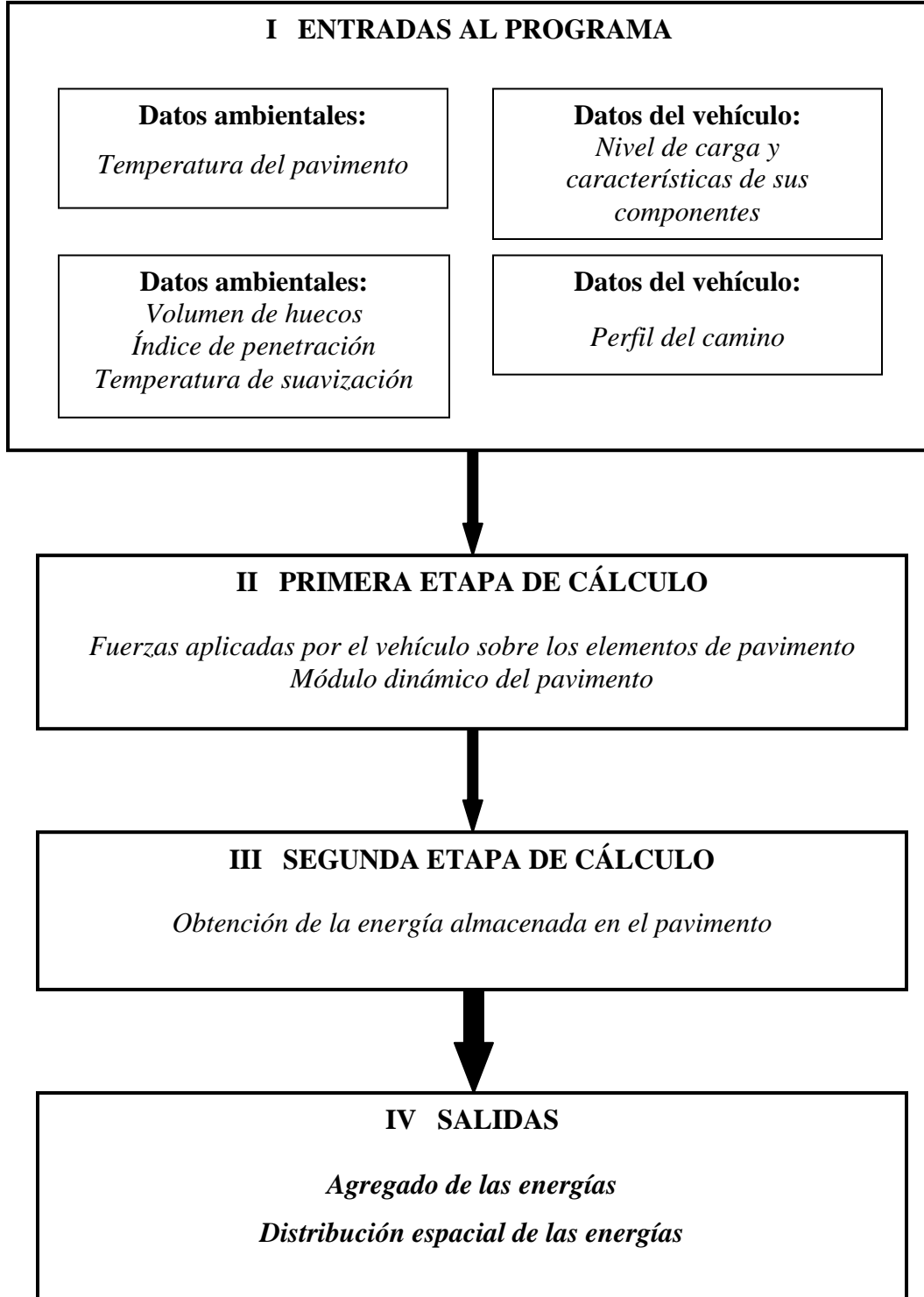


Figura 3-9: Esquema de la simulación del paso de los vehículos pesados sobre el pavimento.

3.3 Análisis paramétrico

En esta sección se efectúa un análisis del efecto de diversas condiciones de operación de los vehículos y propiedades de los pavimentos, sobre los montos de energía de deformación.

3.3.1 Condiciones nominales de prueba

En las simulaciones presentadas en esta sección, se toman como condiciones nominales los valores que son listados en la Tabla 3-1. De esta forma, el parámetro que es evaluado corresponde al que se le realizan los cambios, mientras que las condiciones para las otras propiedades se encuentran listadas en dicha tabla.

Tabla 3-1: Condiciones y propiedades nominales para la simulación.

<i>Temperatura del pavimento:</i>	<i>10°C</i>
<i>Volumen de huecos del pavimento:</i>	<i>30%</i>
<i>Temperatura de suavización del pavimento:</i>	<i>60°C</i>
<i>Velocidad de tránsito:</i>	<i>80 km/h</i>
<i>Índice de Penetración:</i>	<i>-1</i>
<i>Peso Bruto Vehicular (N) al 100% de carga autorizada:</i>	
<i>C2</i>	<i>18 262</i>
<i>C3</i>	<i>27 220</i>
<i>T3-S2</i>	<i>46 380</i>
<i>T3-S3</i>	<i>48 777</i>
<i>Rigidez de las suspensiones:</i>	
<i>Suspensión de rigidez media</i>	<i>3 000 kN / m</i>
<i>Rigidez de las llantas:</i>	
<i>Rigidez media</i>	<i>3 384 kN / m</i>
<i>Amortiguamiento de la suspensión:</i>	
<i>Amortiguamiento medio</i>	<i>30 kN s / m</i>
<i>Rugosidad del pavimento (IIR):</i>	<i>0</i>

3.3.2 Efecto de la velocidad de circulación de los vehículos

La Figura 3-10 muestra el efecto de la velocidad de los vehículos y los montos de energía almacenada en el pavimento, como una función del vehículo simulado para un rango de 20 a 105 km/h.

Estos resultados sugieren que una mayor velocidad implicaría un daño menor en los pavimentos. La proporción en que disminuye la energía resulta independiente del tipo de vehículo, de tal forma que para el aumento de 20 a 105 km/h (5.25 veces), corresponde una reducción de 35% en la energía almacenada en el pavimento.

En estos resultados destaca la proximidad del comportamiento entre los vehículos T3-S2 y T3-S3. Esto sugiere que el vehículo T3-S3 está demasiado castigado en cuanto a los pesos que se le permiten transportar. Sin embargo, habría que tomar en cuenta otras cuestiones para esta evaluación, las cuales estarían relacionadas con la proximidad de las llantas y la superposición de efectos.

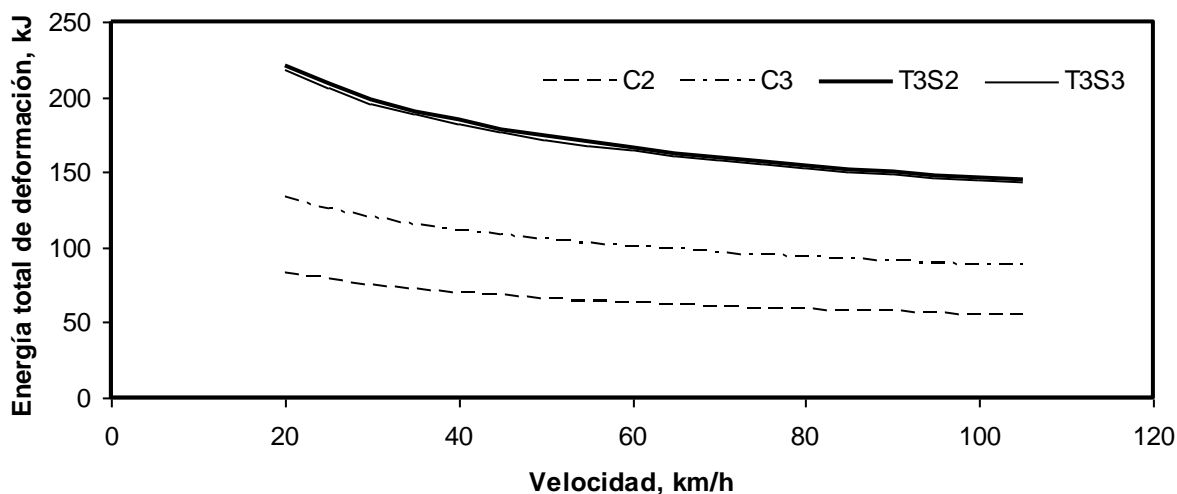


Figura 3-10: Efecto de la velocidad sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales).

3.3.3 Efecto de la rugosidad del pavimento

En la simulación del efecto de la rugosidad del pavimento sobre la energía almacenada, se utilizaron 18 perfiles obtenidos de los estudios del desempeño de los pavimentos a largo plazo (*Long Term Pavement Performance Studies*, LTPP), llevados a cabo por el *Department of Transportation* (DOT) de la *Federal Highway Administration* (FHWA) (DOT, 2006). Las Figuras 3-11 y 3-12 ilustran algunos de estos perfiles.

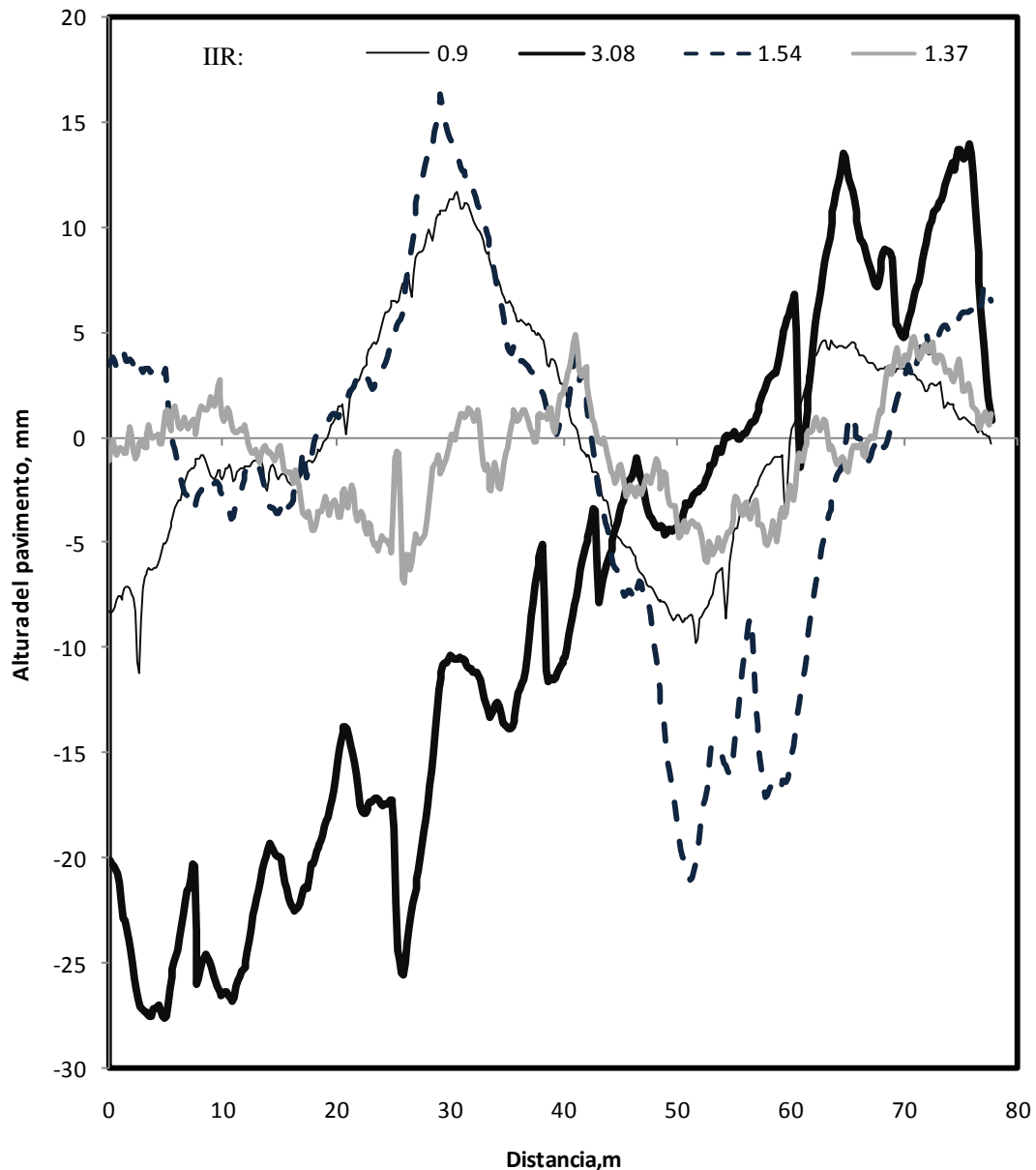


Figura 3-11: Algunos perfiles empleados en la simulación del efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada (primera parte) (DOT, 2006).

En ambas figuras es posible observar las diferencias entre los distintos perfiles, en cuanto a las amplitudes de las alturas y a la complejidad del contenido de las ondulaciones, incluso para perfiles con valores semejantes del IIR. En el caso de la Figura 3-11, las diferencias de apariencia con valores del IIR semejantes se observan en los IIR de 1.54 y 1.37 mm/m. Para la Figura 3-12, esta situación se presenta en los perfiles con IIR de 1.44 y 1.29 mm/m.

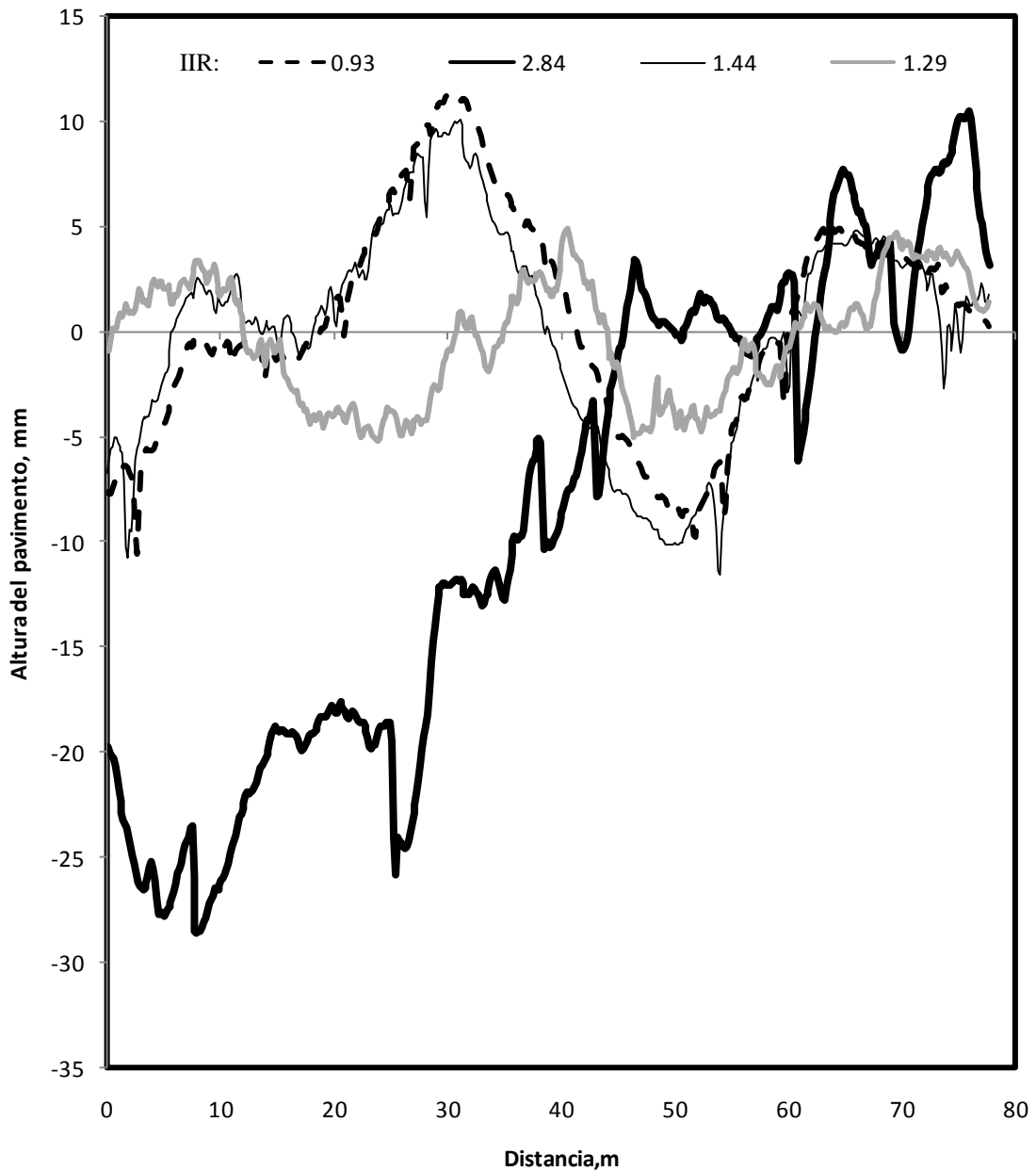


Figura 3-12: Algunos perfiles empleados en la simulación del efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada (segunda parte) (DOT, 2006).

La Figura 3-13 muestra ahora los contenidos de energía almacenada en los 18 perfiles de pavimento, correspondiente al paso de los cuatro tipos de vehículos simulados (C2, C3, T3-S2 y T3-S3) bajo las condiciones nominales, excepto para la velocidad, la cual se tuvo que considerar con un valor de 40 km/h, en lugar de la velocidad nominal de 80 km/h descrita en la Tabla 3.1. Esto debido a las limitaciones de validez de la ecuación para el cálculo del módulo de rigidez del material aglutinante (ecuación 3.2: $0.01seg < t_l < 0.1seg$), en la perspectiva de la longitud de los elementos de pavimento en los perfiles empleados (de 154 mm).

Los resultados muestran tendencias diversas como una función del tipo de vehículo. Por su parte, el vehículo tipo C2 muestra una clara tendencia a disminuir la cantidad de energía almacenada con el incremento en la rugosidad del pavimento. Esta variación se da en el orden de 1%.

Para el caso del vehículo tipo C3, la tendencia se presenta en sentido opuesto respecto al vehículo C2. Esto es, la energía almacenada se incrementa ligeramente con el incremento en la rugosidad. El orden de variación en este caso se estima en menos de 1%. Sin embargo, para este vehículo, semejantes valores de rugosidad implican una dispersión en los valores de la energía contenida (para un IIR alrededor de 1.5 mm/m), lo cual destaca el efecto del perfil específico del pavimento sobre la respuesta dinámica del vehículo y la consecuente energía almacenada en el pavimento.

En cuanto al vehículo tipo T3-S2, se observa una tendencia semejante a la del vehículo tipo C2, esto es, la energía almacenada tiende a disminuir con el incremento en la rugosidad. En este caso, se observa una variación relativamente importante de la energía almacenada con el incremento en la rugosidad, de 6% aproximadamente. Esta variación se debe a la mayor cantidad de ejes y a la consecuente acumulación de efectos. En este caso también se presentan dispersiones en los valores de la energía, al considerar niveles de IIR semejantes. Esto se observa para rugosidades alrededor de 1.5 mm/m.

El vehículo tipo T3-S3 muestra una correlación alta respecto al vehículo tipo T3-S2. Esto se atribuye a las semejanzas en los modos de vibración de los cuerpos vehiculares, que responden de manera semejante a las perturbaciones desde el pavimento. La similitud en las tendencias de los resultados de estos dos vehículos se observan también para el vehículo tipo C2.

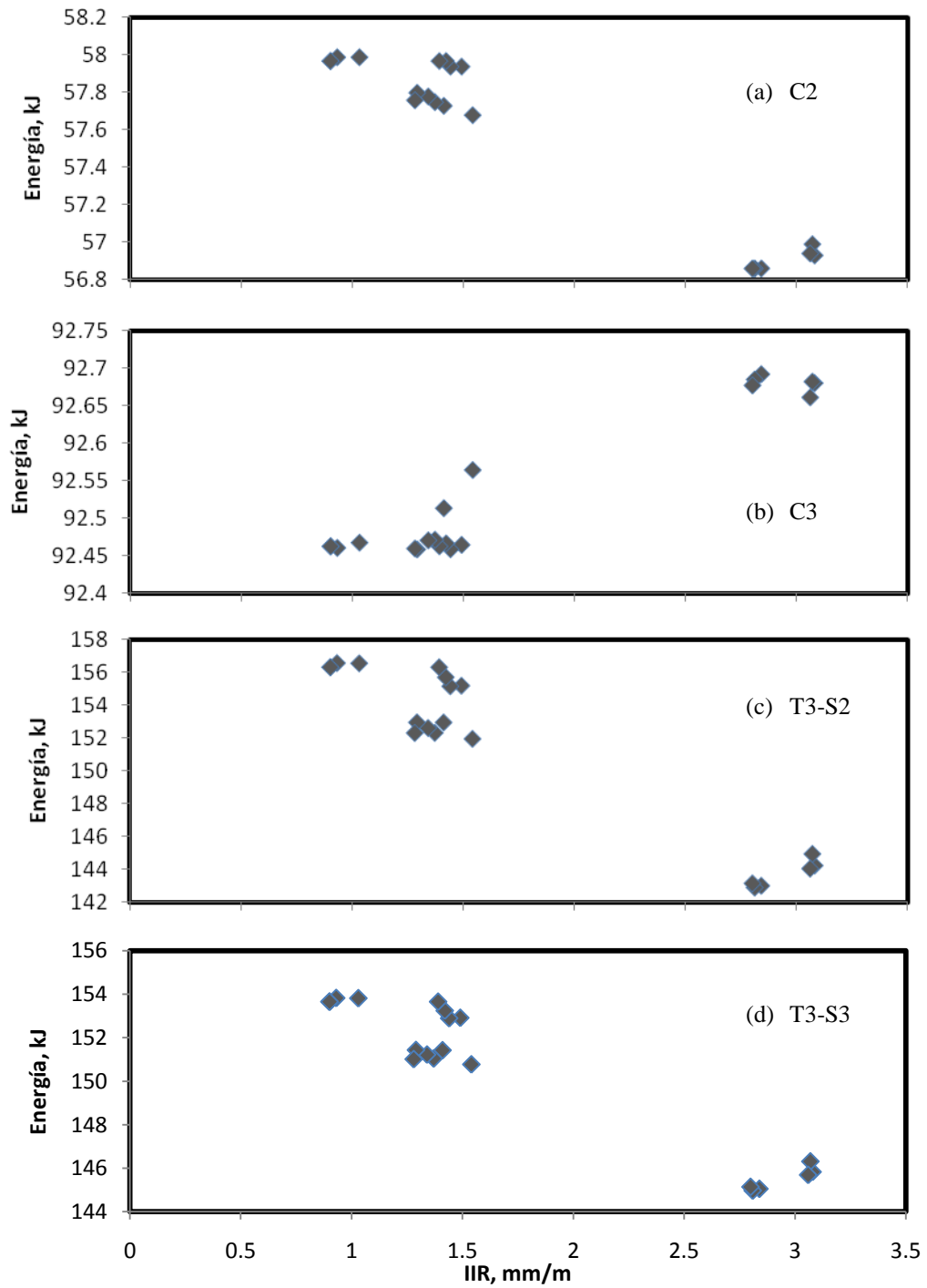


Figura 3-13: Efecto del nivel de rugosidad (IIR) sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales, pero a 40 km/h).

3.3.4 Efecto del nivel de carga

La Figura 3.14 muestra las condiciones nominales de carga de los vehículos simulados, que incluyen la carga útil aproximada y las condiciones de Peso Bruto Vehicular (PBV). Por otro lado, en la Figura 3-15 se muestran los resultados de la simulación en cuanto al efecto del nivel de carga, considerada como un porcentaje de la carga útil máxima permitida, de acuerdo a la normatividad vigente en México.

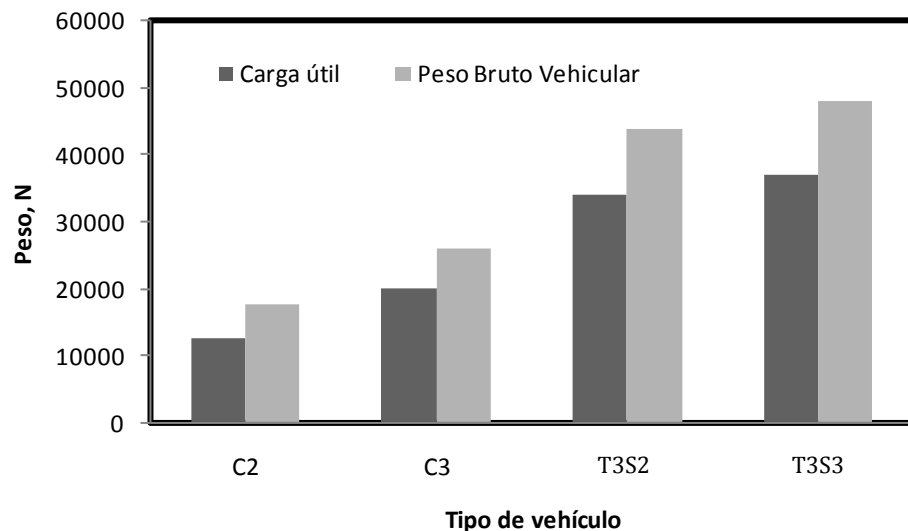


Figura 3-14: Peso normalizado de los vehículos a plena carga.

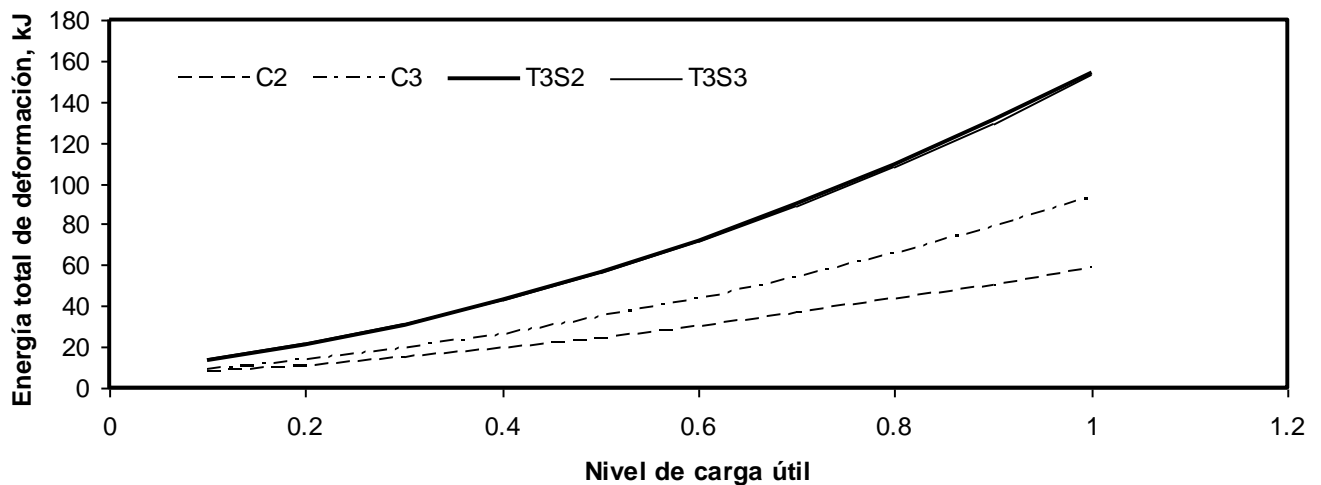


Figura 3-15: Efecto del nivel de carga (en porcentaje sobre la carga máxima permitida) sobre la energía de deformación total almacenada en el pavimento (condiciones nominales).

Las tendencias de estos resultados, muestran que a medida que incrementa el porcentaje de carga útil en los vehículos incrementa el daño en los pavimentos. De esta forma, para el caso del vehículo tipo C2 una variación porcentual de la carga útil transportada que va desde 10 a 100%, implica un incremento de 712% en el daño potencial del pavimento. Esta misma variación porcentual para el caso del vehículo C3, da como resultado un 1162% y, aproximadamente, el 1925% para el caso de los vehículos T3-S2 y T3-S3.

Por otro lado, al igual que en el análisis de la velocidad de los vehículos sobre los niveles de energía almacenada en el pavimento, destaca la proximidad de los resultados obtenidos en el caso de los vehículos tipo T3-S2 y T3-S3. Esto refuerza la idea que, no obstante que el vehículo tipo T3-S3 cuenta con un eje adicional en el semirremolque y por consiguiente lograría una mejor distribución del peso, el vehículo T3-S3 está muy excedido en cuanto al peso máximo que se le permite transportar.

3.3.5 Efecto de la rigidez de las suspensiones

Los perfiles de pavimento empleados para el análisis del efecto de la rugosidad sobre la energía almacenada en el pavimento, también se utilizan para estudiar el efecto de la rigidez de las suspensiones sobre tales valores de energía.

Las variaciones en esta rigidez se dan para algunos de los ejes de los vehículos. De esta forma, por ejemplo, la rigidez de las suspensiones de los ejes direccionales no fue alterada. Adicionalmente, para el caso de los semirremolques sólo fue alterada la rigidez de sus ejes. Esto se deriva de los componentes de los vehículos simulados.

La Tabla 3-2 lista las propiedades de rigidez de las suspensiones consideradas en las simulaciones. En forma aproximada, los valores de la mínima rigidez corresponden a una suspensión de aire, mientras que la rigidez media corresponde a una suspensión de hojas o soleras.

Tabla 3-2: Propiedades de rigidez de las suspensiones de los vehículos para el estudio de su efecto sobre la energía almacenada en el pavimento.

Rigidez (kN/m)	2000 (suave)	3000 (media) †	4000 (dura)
----------------	--------------	----------------	-------------

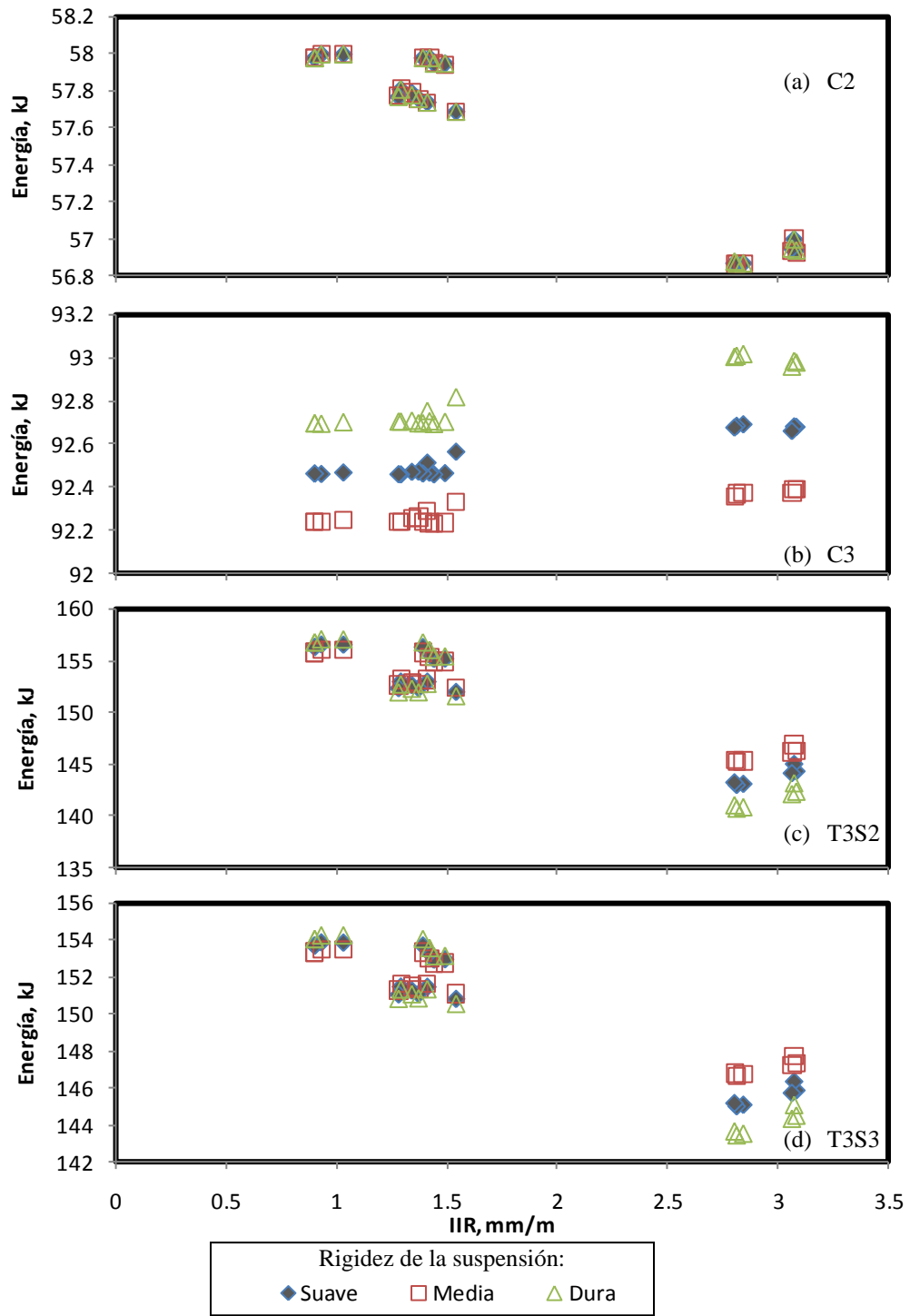


Figura 3-16: Efecto de la rigidez de la suspensión sobre la energía almacenada, en función del tipo de vehículo y de la rugosidad del camino.

Las cuatro partes de la Figura 3-16 muestran el efecto de la rigidez de las suspensiones consideradas sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento, como una función de la rugosidad del pavimento y del tipo de vehículo.

A este respecto, se deben reconocer los efectos mixtos tanto de la rigidez de las suspensiones como de la rugosidad del pavimento sobre los valores de energía de deformación.

De esta forma, mientras que el vehículo tipo C3 muestra un incremento en la cantidad de energía con la rugosidad, los otros vehículos muestran una tendencia opuesta. Los efectos también varían con la suspensión más dura, la cual desarrolla, en general, menores niveles de energía para los pavimentos de más alta rugosidad, a excepción del caso del vehículo tipo C3. El vehículo tipo C2 muestra una variación marginal en la cantidad de energía almacenada con la rigidez de la suspensión.

3.3.6 Efecto de los pares de tracción

Las formulaciones desarrolladas para cuantificar el efecto de los pares de tracción de las llantas de los vehículos sobre el desempeño del pavimento, se emplean ahora de manera comparativa con el modelo original correspondiente al enfoque energético, es decir, con el modelo que consideraba exclusivamente el efecto de las fuerzas verticales de los vehículos sobre el pavimento.

A este respecto, la Figura 3-17 muestra los resultados de estas dos aproximaciones como una función de la velocidad y del tipo de vehículo. Estos resultados presentan un efecto marginal de la energía asociada a los pares de tracción con relación al total de energía almacenada (energía normal y energía tangencial) y, por ende, en el daño potencial causado por los vehículos sobre los pavimentos.

De acuerdo con lo anterior, los incrementos en las energía almacenadas y daño potencial del pavimento, por efecto de los pares de tracción son una función del tipo de vehículo, de la siguiente manera: el vehículo C2 incrementa la cantidad de energía en 1.57%; el vehículo C3 lo aumenta en 1.55%; el vehículo T3-S2 aumenta tan sólo en 0.875%; y el vehículo T3-S3 aumenta en 1.64%.

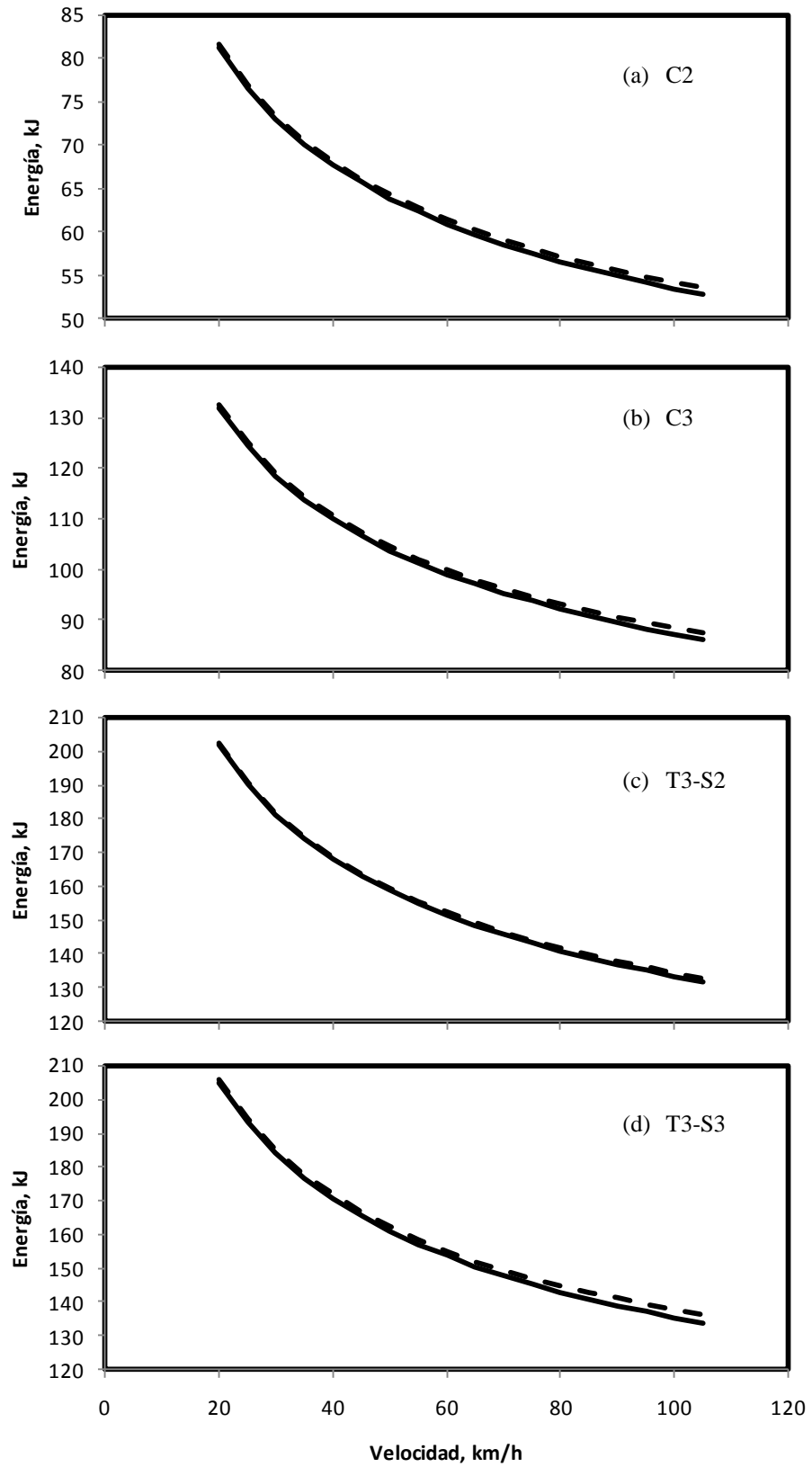


Figura 3-17: Efecto del par de tracción sobre la energía almacenada en el pavimento (condiciones nominales).

3.4 Discusión

Los resultados del análisis paramétrico efectuado, exhiben algunas problemáticas que reflejan de alguna manera la complejidad de la interacción de los vehículos con el pavimento.

Por un lado existen dos aspectos que no habría discusión en cuanto a las tendencias observadas. Estos aspectos se refieren al efecto del nivel de carga y a la velocidad de circulación de los vehículos.

Por otro lado, el aspecto principal que hace discutibles los resultados presentados, se concentra en el efecto de la rugosidad del pavimento, tanto de manera absoluta como en el estudio del efecto de la rigidez de la suspensión. Estos resultados reclaman una revisión cuidadosa de los perfiles considerados en las simulaciones.

A su vez, el efecto de los pares de tracción exhibe ínfimos valores en cuanto a los valores de energía almacenada en el pavimento. Esto hace cuestionable la justificación del desarrollo de la formulación para considerar su efecto dentro de la energía normal. Sin embargo, habría que preguntarse como impactaría este pequeño efecto al considerar flujos vehiculares realistas masivos que es, en última instancia, el escenario para lo cual fue diseñado este modelo desde un principio por Romero y Lozano (2006).

Por lo tanto, en el siguiente capítulo se presenta una estimación económica producto exclusivamente del efecto de los pares de tracción sobre los pavimentos, en el contexto de los montos invertidos por las autoridades encargadas de la conservación y rehabilitación de la infraestructura carretera. Esta estimación busca justificar el desarrollo de la formulación aquí presentada, o por el contrario, si las cifras obtenidas también son marginales, concluir que su incorporación dentro del modelo de la energía normal resulta indiferente en cualquier contexto.

Capítulo 4

Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos por Vehículos Pesados

En los capítulos anteriores se ha justificado de varias maneras la necesidad de contar con alguna medida de desempeño objetiva, que permita establecer los coeficientes de daño de los pavimentos como una función de las características de los vehículos y de los pavimentos, aunadas a las condiciones ambientales. En particular, en el Capítulo 2 se presentaron severas deficiencias en la normatividad vigente a nivel nacional, en lo que se refiere a las características estáticas que deben de cumplir los vehículos pesados. De igual manera, se identificaron una serie de limitaciones en los cargos por uso de infraestructura propuestos e implementados en algunas carreteras de cuota alrededor del mundo. Al respecto, en el Capítulo 3 se presentó un análisis paramétrico que indica que una medida de desempeño basada en la energía de deformación normal y angular del pavimento podría representar un avance al respecto.

Atendiendo a estas necesidades, en este capítulo se hace la propuesta formal para este Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos por Vehículos Pesados. Se nombra integral debido a que toma en cuenta tanto las fuerzas verticales que los vehículos ejercen sobre el pavimento, así como las fuerzas tangenciales asociadas a los pares de tracción de los ejes motrices sobre la interfaz llanta-pavimento, tal y como se describió en el capítulo anterior. Dicho coeficiente se establece como una función de una serie de características determinadas, tanto para los vehículos como para el pavimento.

De esta forma, el contenido de este capítulo se ordena en cuatro partes. Primeramente, se establecen las características que debe de cumplir el coeficiente propuesto. En seguida, se define el coeficiente integral

de daño a pavimentos por vehículos pesados, en función de la simulación del paso del vehículo sobre un perfil de pavimento dado. Posteriormente, se presentan estudios de caso de dos tráficos de vehículos pesados medidos en México y en Francia, con el objeto de evaluar el nivel de daño causado en el pavimento. Finalmente, se calculan los costos asociados al daño del pavimento, los cuales son atribuibles a uno de estos tráficos, en particular, el correspondiente a México. Estos costos se comparan con las tarifas establecidas en una carretera de cuota representativa, para observar las diferentes condiciones presentes en una situación real de tráfico mixto de vehículos pesados. Adicionalmente, se estima el costo por concepto del efecto exclusivo de los pares de tracción, esto con el fin de verificar su importancia dentro del estudio de la interacción masiva de los vehículos pesados con el pavimento.

4.1 Formulación

Existen diversos conceptos que se han desarrollado para medir diversos efectos asociados al tráfico de los vehículos pesados sobre el pavimento. Así, la escala de medida propuesta debería satisfacer diversas características. De manera particular, un parámetro en este sentido, debería tener las siguientes propiedades:

- Ser portable;
- Ser numérico;
- Correlacionar con lo que se pretende medir; y
- Estar basado en consideraciones físicas, asociadas a la interacción de los vehículos pesados con los pavimentos.

La portabilidad del coeficiente a ser propuesto, significa que debería ser posible aplicarlo en diversos contextos, por operadores ajenos a su formulación. El ejemplo típico de una medida de desempeño que cumple con estas características, está representado por el Índice Internacional de Rugosidad (IIR), como se expuso en el Capítulo 1.

4.2 Concepto

Dado que se tienen diversos efectos como una función de las propiedades de los vehículos y de las condiciones de operación, se propone que el grado de agresividad de los vehículos para con el pavimento, sea asociado al paso del vehículo sobre un tramo carretero y con base en esto se determine el coeficiente de daño.

De forma particular, a semejanza de lo que ocurre con el IIR, se propone que el daño potencial del pavimento sea establecido a partir de la simulación del tránsito del vehículo sobre un perfil de pavimento dado. Este vehículo estaría equipado con características convencionales en cuanto al tipo de suspensión y llantas, así como con una distribución nominal de la carga entre sus diferentes ejes.

El perfil de pavimento empleado, tendría una longitud de 136 metros y estaría discretizado a intervalos de 0.3 metros. La longitud de 136 metros, se asume en la perspectiva de que en esta distancia se cubren varios segundos de la respuesta del vehículo. Esto es, a lo largo de esta longitud se simularía el paso del vehículo a una velocidad de 80 km/h (22.2 m/s). De esta forma, el tiempo de simulación del tránsito del vehículo sería igual a $(136 \text{ m}) / (22.2 \text{ m/s})$, que da como resultado 6.12 segundos.

En un periodo de tiempo de simulación de 6.12 segundos, se tendrían alrededor de 15 ciclos de vibración para los modos más bajos de vibración de las masas suspendidas del vehículo, las cuales se encuentran entre 2 y 3 Hz como una función del tipo de suspensión empleado (aire o de hojas).

En cuanto a la vibración de las masas no suspendidas del eje, que se encuentra alrededor de los 12 Hz, un periodo de simulación de 6.12 segundos implicaría decenas de ciclos de vibración de estas masas, con lo que al igual que para las masas suspendidas, se asegura el efecto adecuado para esta vibración.

De esta manera, el periodo de 6.12 segundos, tomaría en cuenta cualquier transitorio durante el inicio de la perturbación por efecto del perfil del pavimento.

De las simulaciones efectuadas, el nivel de agresividad a plena carga de los vehículos se tomaría como una función de la temperatura del pavimento y velocidad de tránsito.

4.3 Estudios de caso

Se presenta un análisis de las energías asociadas al paso de los diferentes vehículos, como una función de la rugosidad del pavimento, la hora a la que transitan y del nivel de carga. Se ha asumido una variación armónica de la temperatura a lo largo del día.

4.3.1 Aplicación para cero rugosidad del pavimento – datos del flujo vehicular medido en Francia

Como se mencionó en el alcance de esta investigación (ver Capítulo 1), a efecto de poner dentro del contexto internacional la situación prevaleciente en México en cuanto al uso de la infraestructura carretera por parte de los vehículos pesados, se incluye el análisis de un tráfico medido en el extranjero. A este respecto, el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, LCPC) de Paris Francia, ha desarrollado una metodología para el pesado en movimiento de los vehículos, la cual utiliza instrumentos de pesaje basados en principios piezoeléctricos.

La Tabla 4-1 muestra algunas de las 43 variables almacenadas en la base de datos del LCPC. Como se puede observar en esta tabla, los datos capturados incluyen tanto las condiciones de operación de los vehículos, así como algunas cuestiones administrativas. Además, cabe señalar que dentro de este conjunto de datos se incluyen la temperatura del pavimento y la velocidad individual de cada vehículo. En particular, estas dos variables se han destacado previamente en los Capítulos 1 y 2 de esta tesis, debido al efecto que tienen sobre los pavimentos asfálticos.

De acuerdo al LCPC, se identifican hasta 22 categorías que cubren desde vehículos de pasajeros hasta diversas combinaciones vehiculares. En cuanto a los vehículos pesados, sin embargo, se encontró que el tipo de vehículo más comúnmente empleado en Francia corresponde al T2-S3, esto es, se trata de vehículos simplemente articulados en los que el tractor tiene dos ejes y el semirremolque tres ejes.

La Figura 4-1 muestra a un vehículo tipo T2-S3, el cual es poco común encontrar en México. Este vehículo consiste de un tractor con la cabina sobre el motor y cuenta con sólo dos ejes. De acuerdo con la

base de datos del LCPC, el segundo vehículo más empleado en Francia corresponde al C2, esto es, el vehículo unitario de dos ejes.

La Tabla 4-2 lista las velocidades y pesos máximos autorizados para los camiones más comúnmente empleados en Francia. En general, los vehículos pesados tienen la misma velocidad máxima permitida.

Tabla 4-1: Datos capturados por el sistema de monitoreo del LCPC.

Clave de identificación de la medición

Hora

Día/mes/año

Sección del camino

Sentido de circulación

Clave de estación de pesaje

Categoría vehículo

Distancia entre ejes

País de procedencia

Placas del vehículo

Peso bruto vehicular

Temperatura del camino

Velocidad del vehículo

Peso por eje de varios sensores

Peso por eje promedio

Tabla 4-2: Velocidades y pesos máximos autorizados para los camiones más comúnmente empleados en Francia.

<i>Vehículo</i>	<i>Peso máximo autorizado</i>	<i>Velocidad máxima autorizada</i>
	<i>(Ton)</i>	<i>(km/h)</i>
<i>T2-S3</i>	<i>40</i>	<i>90</i>
<i>C2</i>	<i>19</i>	<i>90</i>



Figura 4-1: Vehículo tipo T2-S3, el más empleado en Francia.

De esta forma, debido a que la base de datos del LCPC incluye diversos parámetros que pueden ser analizados con el enfoque desarrollado en esta tesis, se utiliza esta información para realizar la simulación del efecto de estas distintas variables en el daño potencial del pavimento para un tráfico de vehículos medido en Francia (registrado en la base de datos provista por el LCPC). Posteriormente, estos resultados se comparan con los datos obtenidos de la simulación de un tráfico de vehículos medido en México.

4.3.1.1 Vehículo articulado T2-S3

La muestra de vehículos del tipo T2-S3 consistió de 1102 unidades, que circularon por una de las estaciones de monitoreo instaladas por el LCPC el día 30 de noviembre de 2007.

La Figura 4-2 presenta el Peso Bruto Vehicular (PBV) de los vehículos monitoreados. En esta gráfica se muestra la línea que representa el peso autorizado para estas unidades. De acuerdo con estos datos, el vehículo más cargado circuló con un PBV de 49.3 Ton, mientras que el menos cargado lo hizo con 10.3 Ton. El PBV promedio en el tráfico de este tipo de vehículos fue de 30 Ton, con una desviación estándar de 9.36 Ton, lo que representa 31.2 %.

La Figura 4-3 muestra la dispersión de las temperaturas del pavimento a las cuales se dio el tránsito de los vehículos T2-S3. Estas variaciones correspondieron de manera aproximada a las 24 horas del día y mostraron una tendencia armónica.

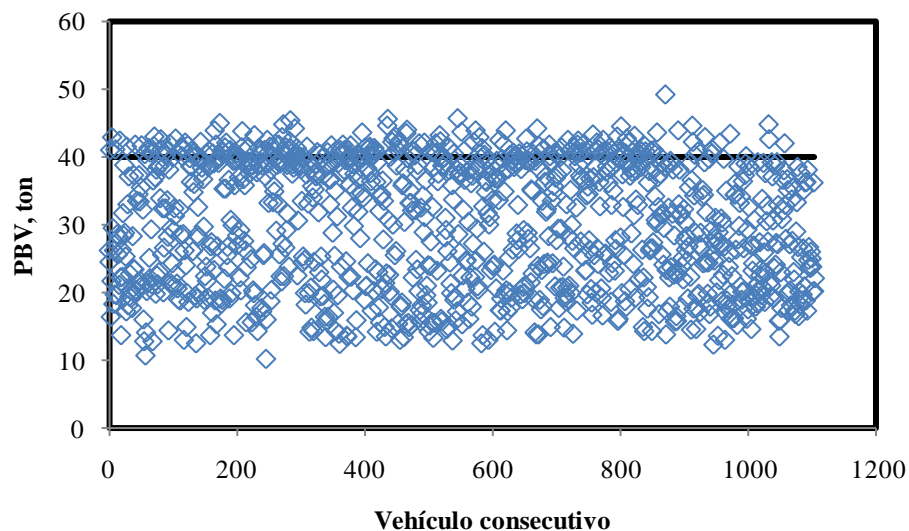


Figura 4-2: Dispersión de valores del PBV de los vehículos tipo T2-S3 medidos en Francia por el LCPC.

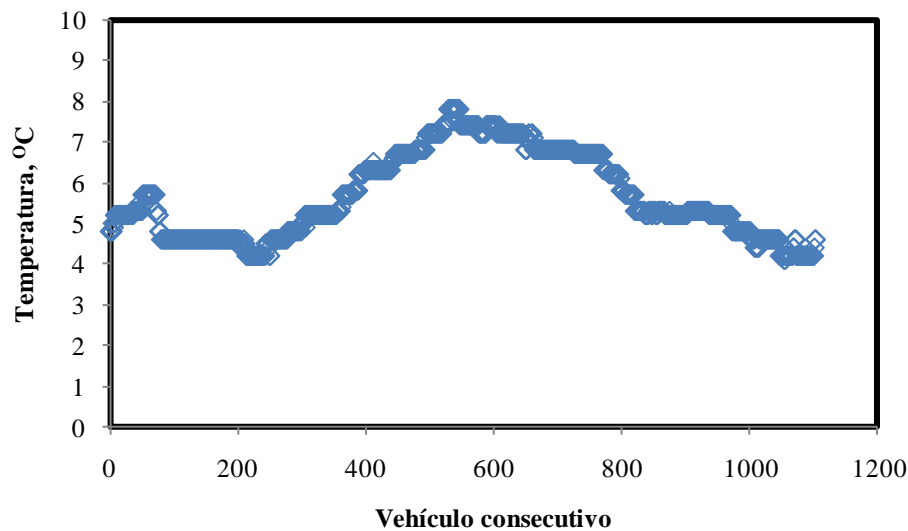


Figura 4-3: Variación de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo T2-S3 medida en Francia por el LCPC.

La temperatura promedio del camino para el tráfico de los vehículos T2-S3 fue de 5.6 °C (278.6 °K), con una variación estándar de 1.04 °K, lo que representa un 0.37 % en términos de la temperatura absoluta.

Como datos finales, la Figura 4-4 muestra la dispersión de la velocidad en el tráfico de los vehículos tipo T2-S3. Para este caso, se tuvieron velocidades máximas y mínimas de 93 y 74 km/h, con un promedio de 87.2 km/h. La desviación estándar para esta propiedad del tráfico fue de 1.64 km/h, lo que representa una variación porcentual de tan sólo 1.86%.

Con estos datos (de la Figura 4-2 a la 4-4) y una superficie perfecta de pavimento (IRR cero) con una longitud de 136 m, se procedió a realizar la simulación del tráfico de vehículos medido. Al respecto, la Figura 4-5 muestra los resultados obtenidos en términos de la energía almacenada en el pavimento.

La máxima energía almacenada en el pavimento por el tránsito de un vehículo tipo T2-S3 fue de 144.9 kJ, que se dio para un vehículo con un PBV de 45.8 Ton, con una velocidad de 88 km/h y con el pavimento a 7.8 °C. Por otro lado, la energía mínima asociada a un vehículo de este tipo, fue de 7.54 kJ para un PBV de 10.3 Ton, para una velocidad de circulación de 87 km/h y con el pavimento a 4.5 °C.

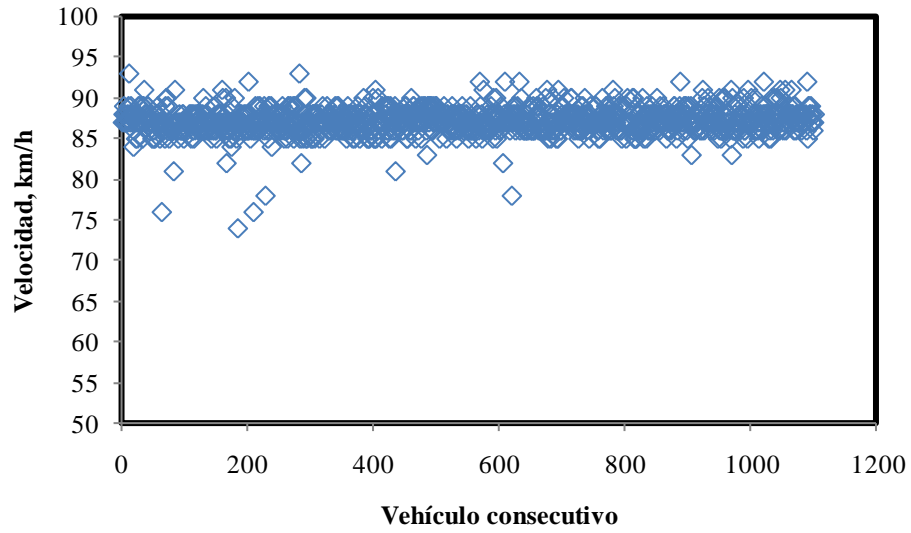


Figura 4-4: Dispersión de la velocidad de los vehículos tipo T2-S3 medida en Francia por el LCPC.

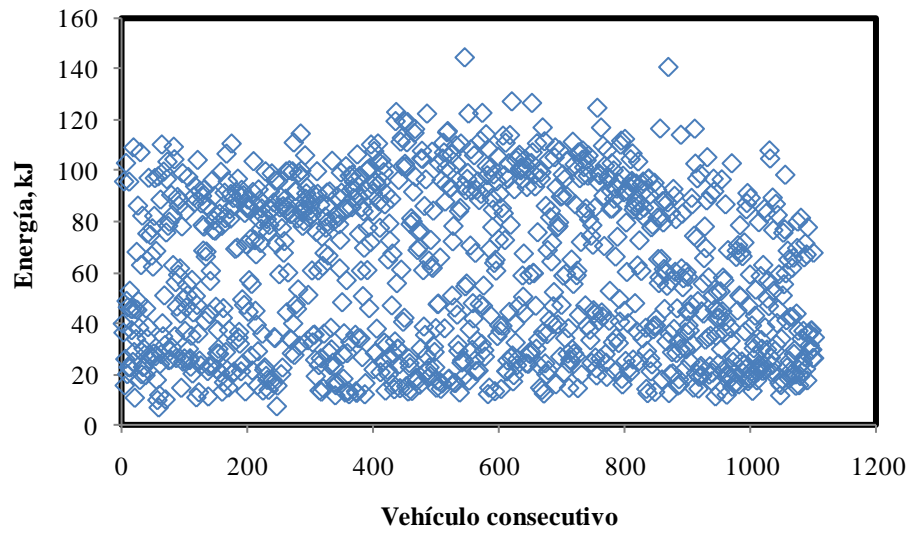


Figura 4-5: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T2-S3.

El valor promedio de la energía almacenada en el pavimento fue de 59.2 kJ, con una desviación estándar de 32.25 kJ, que corresponde a un 54.5%.

Estos resultados muestran que la energía de deformación manifiesta una gran sensibilidad a las condiciones de operación de los vehículos, de tal suerte que los resultados obtenidos presentan una mayor dispersión con relación a las variables consideradas. Ello a pesar de que las variaciones de temperatura y de velocidad fueron mínimas.

La Figura 4-6 muestra las desviaciones estándar de las cuatro características analizadas en este trabajo, expresadas en porcentaje respecto al valor promedio.

De esta manera, la metodología de la energía de la deformación, representa una amplificación de las variaciones de las otras características del flujo.

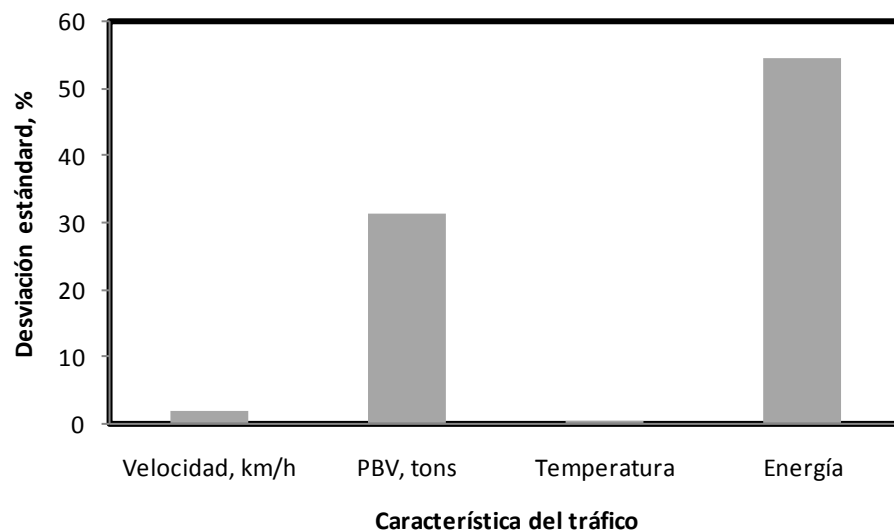


Figura 4-6: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T2-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

4.3.1.2 Vehículo unitario C2

Ahora se presentan los datos correspondientes al vehículo tipo C2, en el flujo medido por el LCPC, así como los valores de las energías almacenadas en el pavimento para cada uno de los vehículos en el tránsito. La muestra consistió de 127 vehículos, a lo largo de 24 hrs.

La Figura 4-7 muestra las variaciones en los PBV de los vehículos C2, así como el valor máximo autorizado para estos vehículos. El máximo PBV fue de 23.6 Ton, mientras que el mínimo fue de 4.7 Ton, lo que representa de forma aproximada el peso de la tara del vehículo. La relación de máximo a mínimo es de 4.7. Para estos datos, el valor promedio de PBV es de 11.84 Ton, con una desviación estándar de 3.78 Ton, que representa 31.9% respecto al valor promedio.

De acuerdo con estos datos, cinco de los 127 vehículos en total, sobrepasan el peso máximo permitido según la normatividad francesa.

En cuanto a la variación de la temperatura del pavimento durante el paso de este tráfico de vehículos, la Figura 4-8 muestra los datos correspondientes.

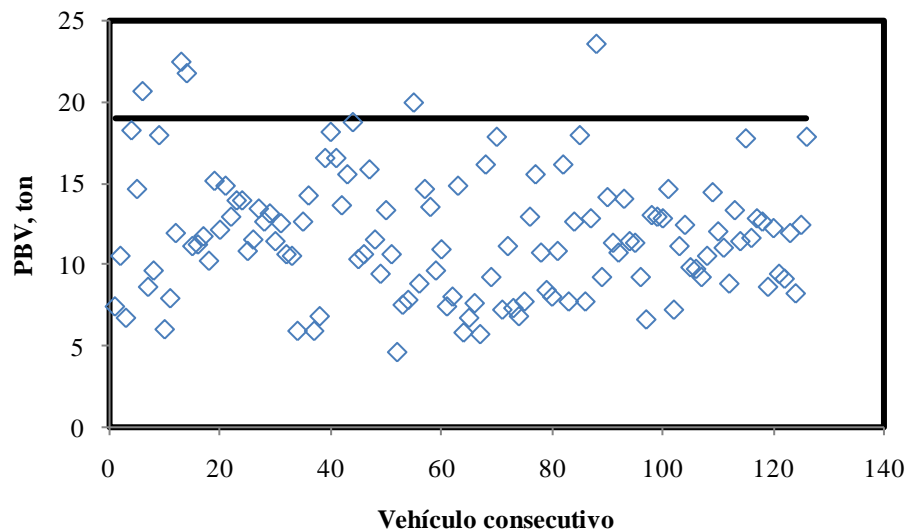


Figura 4-7: Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C2 medidos en Francia por el LCPC.

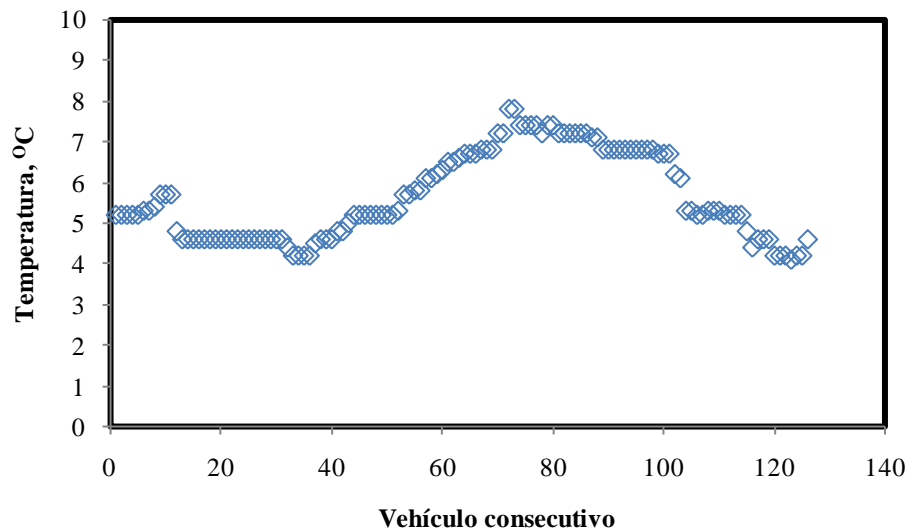


Figura 4-8: Variación de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo C2 medida en Francia por el LCPC.

La gráfica de la temperatura mostrada en la Figura 4-8, muestra una variación aproximadamente armónica para esta propiedad del pavimento. De acuerdo con esto, la temperatura mínima del pavimento fue de 4.1 °C, con una máxima de 7.8 °C. Medida en temperatura absoluta, la temperatura promedio fue de 278 °K (5 °C), con una variación estándar de 1.07 °K, que en porcentaje respecto al promedio es de 0.38%.

En cuanto a la velocidad de circulación de los vehículos tipo C2 en el tráfico medido, la Figura 4-9 muestra la dispersión de esta característica. De acuerdo con estos datos, la velocidad máxima de circulación de este tipo de vehículo fue de 99 km/h y la mínima de 84 km/h.

La velocidad promedio fue de 88.5 km/h, con una desviación estándar en términos absolutos de 2.35 km/h, que representa un porcentaje de 2.66 %.

Este tipo de vehículo, muestra una dispersión ligeramente mayor respecto al vehículo T2-S3 analizado en la sección precedente (1.86%).

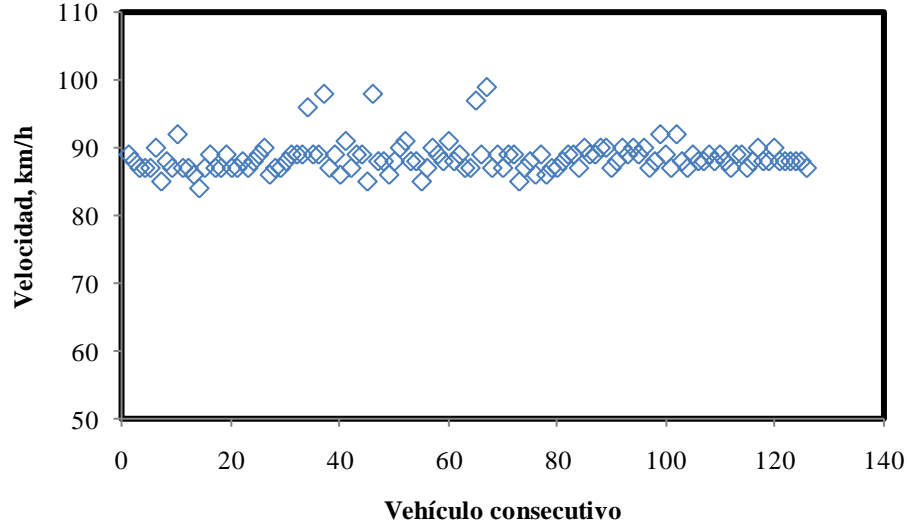


Figura 4-9: Dispersión de la velocidad de los vehículos tipo C2 medida en Francia por el LCPC.

Con estos datos (de la Figura 4-7 a la 4-9) se procedió a simular el paso de este tráfico por una superficie de pavimento perfecta (IIR cero), libre de ondulaciones o cualquier otra variación de la altura del pavimento. Se consideró la longitud normalizada de pavimento de 136 m.

La Figura 4-10 muestra los resultados para la energía almacenada en el pavimento para este flujo de vehículos tipo C2. De acuerdo con estos resultados, la energía de deformación máxima, asociada a alguno de estos vehículos, es de 100.14 kJ y la mínima de 3.21 kJ, lo que da una relación de máximo entre el mínimo de 31.2.

El valor promedio de la energía almacenada fue de 22.08 kJ, con una desviación estándar de 15.36%, lo que representa 69.58% respecto al valor promedio. El valor máximo de energía correspondió a un vehículo al circular con un PBV de 23.6 Ton (claramente sobrecargado), con una velocidad de 90 km/h sobre un pavimento a 7.1 °C. El valor mínimo de energía se dio para un vehículo con una velocidad de 91 km/h, con un PBV de 4.7 Ton y una temperatura del pavimento de 5.3 °C.

El efecto de la energía de deformación, en el sentido de magnificar las variaciones de las características de circulación de los vehículos, se muestra en la Figura 4-11.

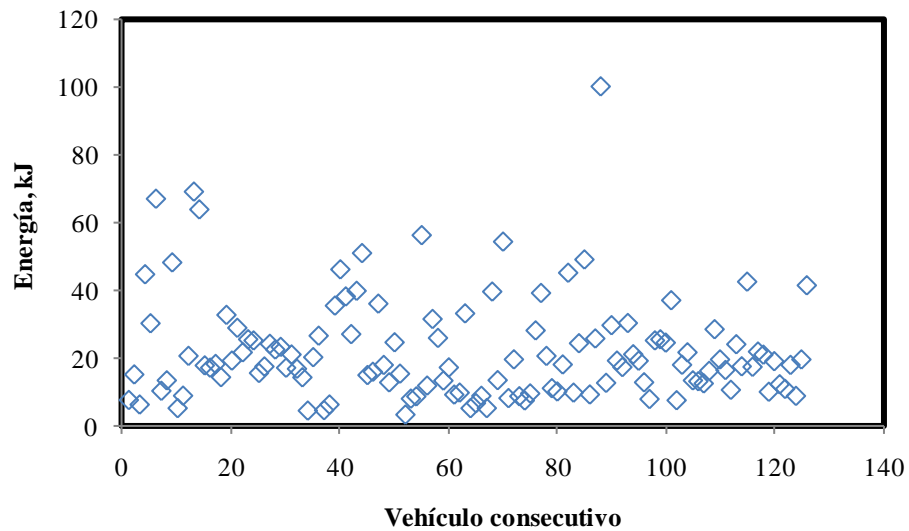


Figura 4-10: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C2.

Como se puede apreciar al comparar la Figura 4-11 (vehículo C2) con la Figura 4-6 (vehículo T3-S2), la dispersión mayor se observa en el caso del vehículo C2.

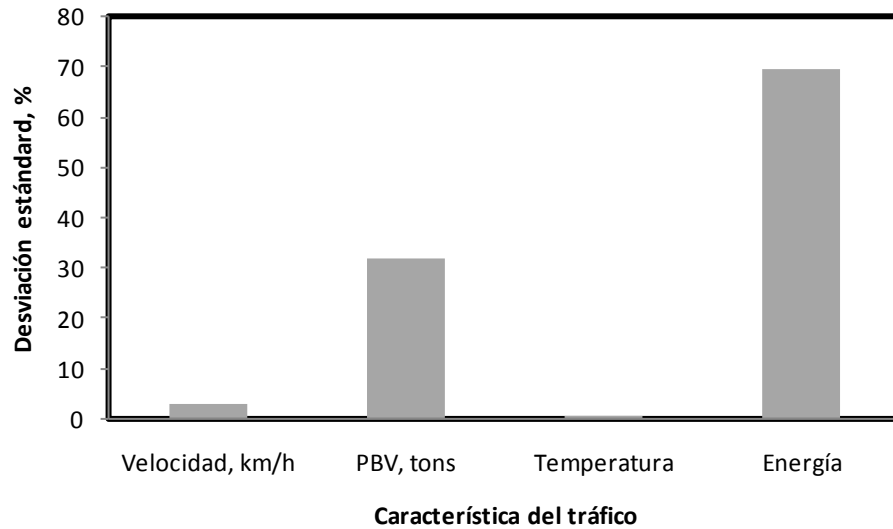


Figura 4-11: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

La Figura 4-12, muestra las dispersiones de los PBV y de las energías para ambos vehículos. De esta forma, el vehículo C2 implica mayores variaciones en sus condiciones de operación, lo que a su vez se traduce en una dispersión mayor en la energía almacenada y el daño potencial del pavimento.

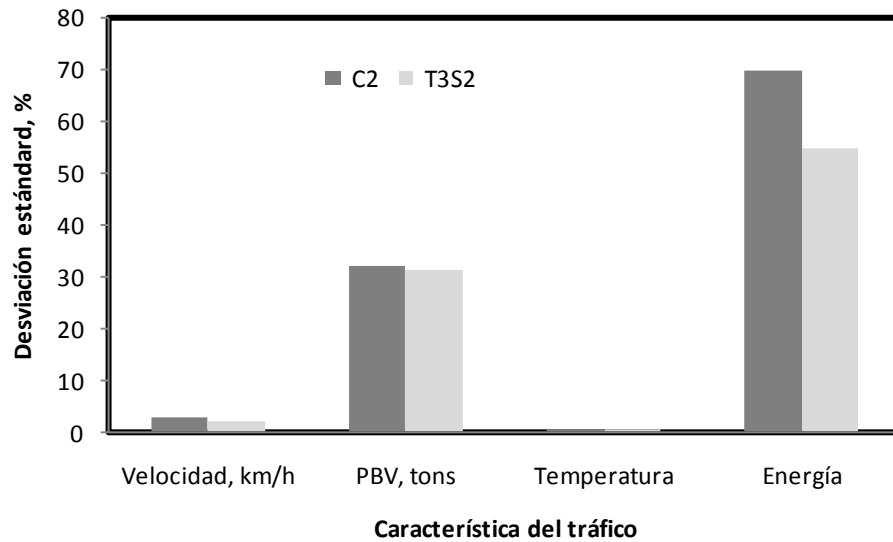


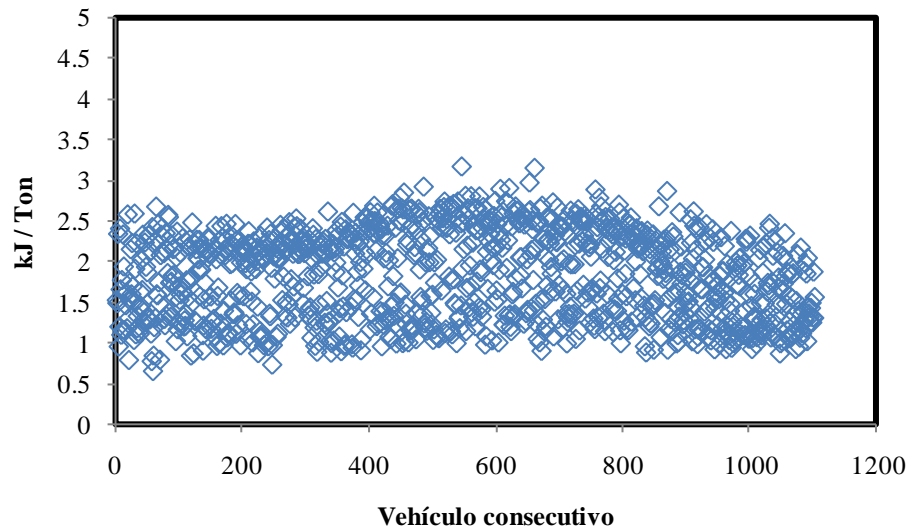
Figura 4-12: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2 y T2-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

En cuanto a las energías almacenadas en el pavimento por ambos vehículos, ahora se calcula la relación específica de cantidad de energía por Ton de PBV.

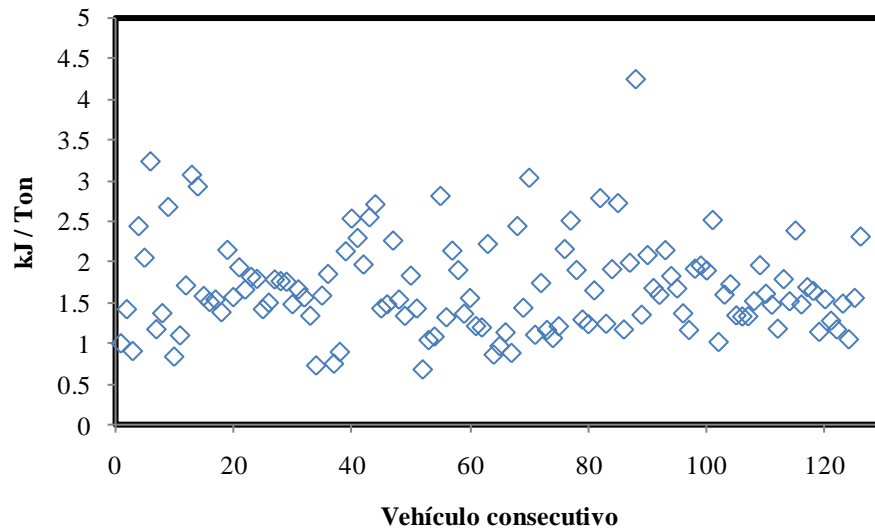
Las partes de la Figura 4-13 muestran los valores específicos de la cantidad de energía almacenada en el pavimento por Ton de PBV, para los dos tipos de vehículos analizados. Las dispersiones indican claramente que los diferentes factores involucrados (pesos por eje, velocidad de circulación y temperatura del pavimento), afectarían de manera importante el efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento. Los valores promedio de kJ/Ton son de 1.81 y 1.64, respectivamente para el vehículo tipo T2-S3 y C2. Sin embargo, este último vehículo exhibe la mayor dispersión, con una desviación estándar de 34.8% comparada con 29% de la desviación estándar normalizada para el caso del vehículo T2-S3.

De acuerdo a estos cálculos, el vehículo C2 haría un mejor uso de las infraestructuras, dado que ambos flujos vehiculares se dieron en condiciones semejantes de velocidad y temperatura del pavimento.

Esta situación favorable del vehículo C2, se puede atribuir a la mayor facilidad para distribuir la carga en estos vehículos, respecto a los vehículos T2-S3. Esto se asociaría a las propiedades de las suspensiones y a la manera de cargar al vehículo.



(a) Vehículo tipo T2-S3



(b) Vehículo tipo C2

Figura 4-13: Dispersiones de la energía específica almacenada en el pavimento por cada Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos tipo: (a) T2-S3 y (b) C2.

4.3.2 Aplicación para cero rugosidad del pavimento – datos del flujo vehicular medido en México

En esta sección se aplica la metodología propuesta para el estudio de un tráfico medido en México, compuesto por cuatro diferentes tipos de vehículos (C2, C3, T3-S2 y T3-S3), que circularon por un tramo carretero en regular estado. Sin embargo, a diferencia del estudio de caso anterior, correspondiente al tráfico medido en Francia, en el flujo medido en México no se cuenta con los valores de las velocidades de circulación de los vehículos ni con las temperaturas del pavimento. Por lo tanto, estas dos variables se toman con base en los valores reportados con antelación, respecto a este mismo flujo medido (Romero y Lozano, 2000B). Adicionalmente, ahora se considera la respuesta dinámica de los vehículos a diferentes perfiles de pavimento, caracterizados por su IIR. No obstante, se presenta inicialmente la simulación del tráfico sobre un pavimento de nula rugosidad (IIR cero), con objeto de comparar estos resultados con los obtenidos en el caso del flujo europeo y analizado en la sección anterior.

El tráfico medido estuvo compuesto de: (i) 663 vehículos tipo C2; (ii) 198 vehículos tipo C3; (iii) 243 vehículos T3-S2; y (iv) 114 vehículos T3-S3. Esta información fue obtenida de una de las encuestas realizadas por parte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), denominada “Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional”, correspondiente al año de 1996 (Gutiérrez *et al.*, 1999).

La Figura 4-14 ilustra la distribución horaria de los vehículos. Se puede observar un claro efecto del tiempo sobre la cantidad de vehículos en tránsito, con más o menos vehículos por hora como una función de la hora del día. Esta sensibilidad del tráfico de los diferentes tipos de vehículos a la hora del día, se muestra en la Figura 4-15. En esta figura se muestra el tráfico promedio por hora de los diferentes vehículos y la desviación estándar horaria del tráfico, tanto en términos absolutos como en términos relativos respecto al valor promedio. De esta manera, aunque el vehículo tipo C2 manifiesta la mayor dispersión absoluta, es el vehículo T3-S2 el que muestra una mayor dispersión relativa. El vehículo que presenta una sensibilidad menor a la hora del día, es el tipo C3, el cual además promedia un tráfico menor.

Ahora se desarrollará un análisis semejante al realizado para el flujo vehicular medido en Francia. Este análisis se efectuará para cada tipo de vehículo por separado, para después realizar una evaluación comparativa de los diferentes vehículos en cuanto a la energía que transfieren al pavimento por Ton de PBV.

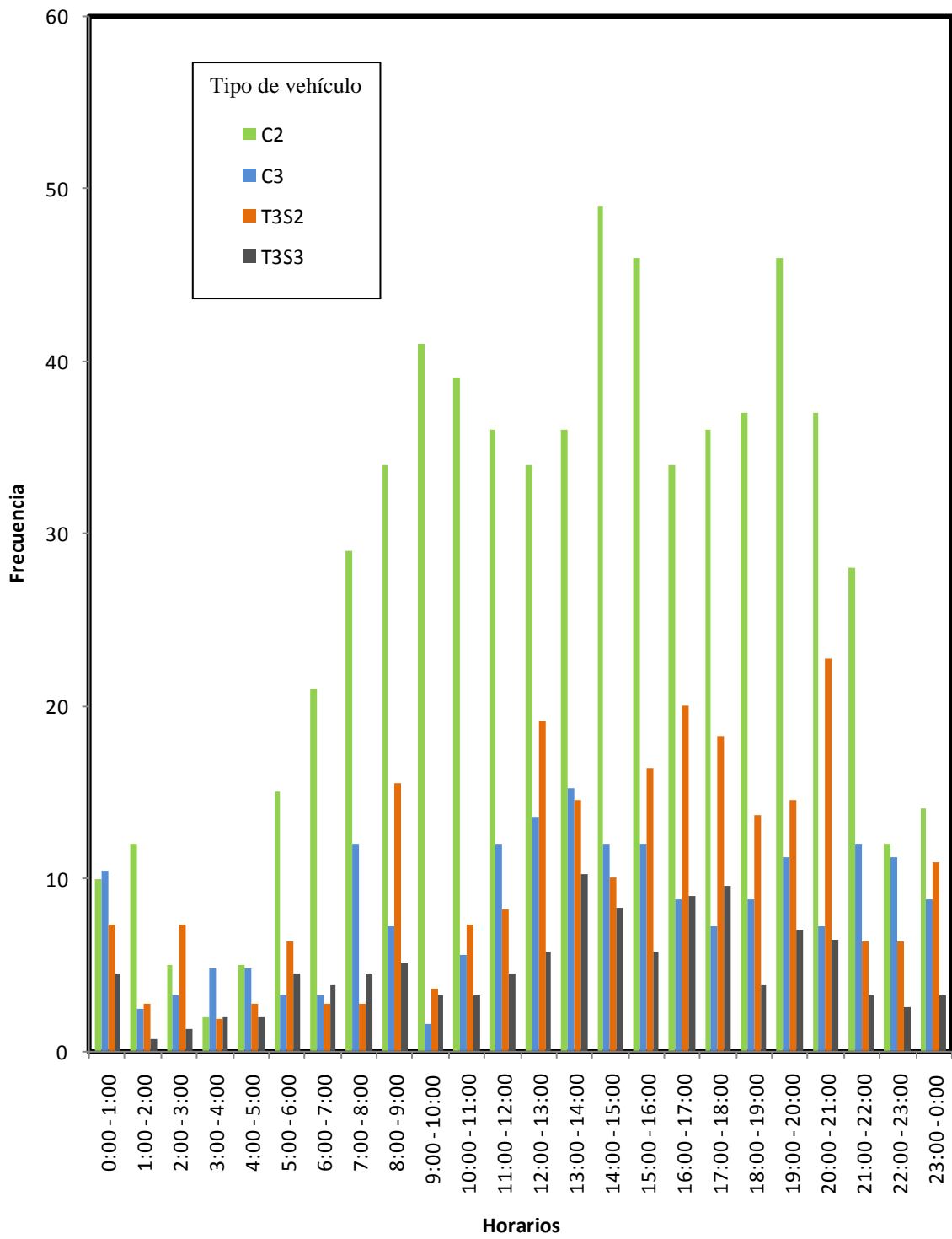


Figura 4-14: Distribución horaria del tráfico medido en México (con datos de Gutiérrez *et al.*, 1999).

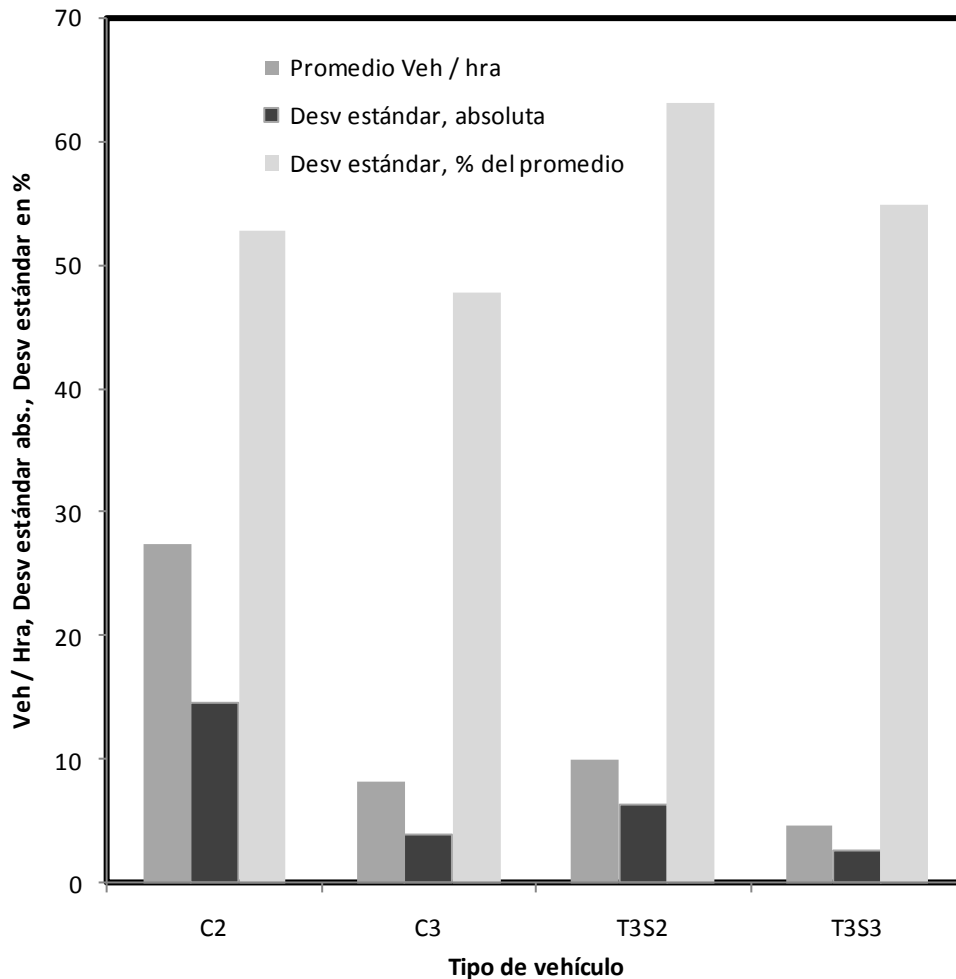


Figura 4-15: Características de dispersión horaria del tráfico medido en México.

4.3.2.1 Vehículo unitario C2

Las Figuras 4-16, 4-17 y 4-18 muestran el PBV, la temperatura del pavimento y la velocidad de circulación para el flujo de vehículos tipo C2. Mientras que los valores del PBV corresponden a los datos medidos (los cuales manifiestan sobrecarga en algunos casos), los valores de temperatura y de velocidad han sido estimados, a partir de una variación armónica de la temperatura a lo largo del día y una velocidad promedio de 80 km/h, a la que se adiciona un componente aleatorio de alrededor de más o menos 10 km/h, con base en lo reportado con anterioridad para este flujo de vehículos (Romero y Lozano, 2000B). En la Figura 4-16 se incluye el máximo PBV permitido para caminos tipo A (SCT, 2008).

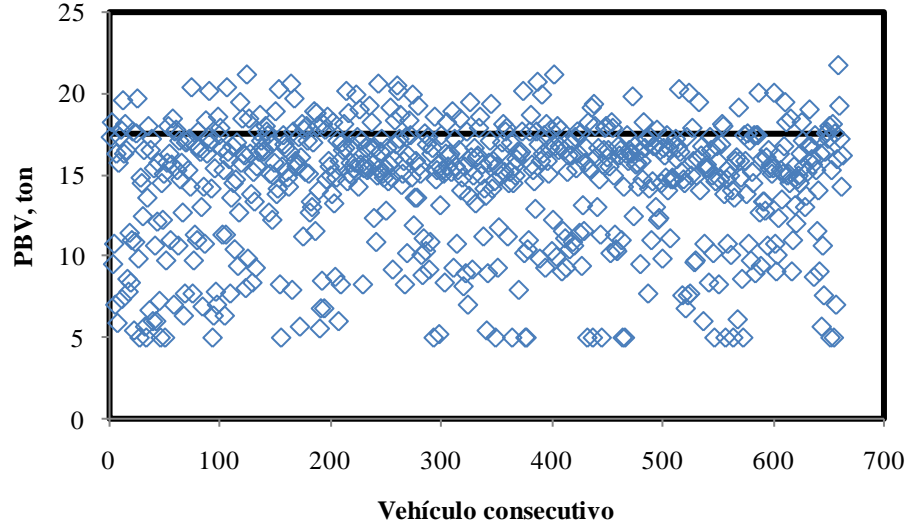


Figura 4-16: Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C2 medidos en México por el IMT.

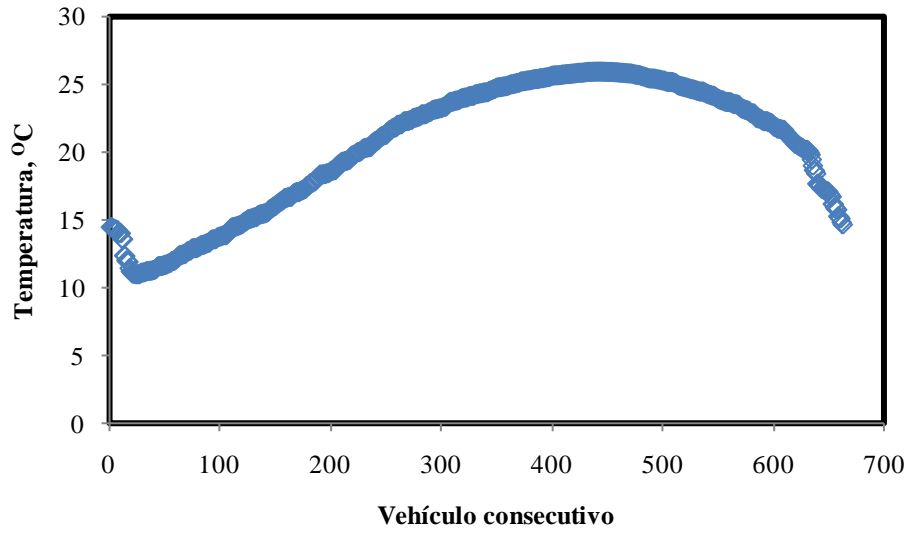


Figura 4-17: Variación simulada de la temperatura del pavimento a lo largo del día durante el tráfico del vehículo tipo C2.

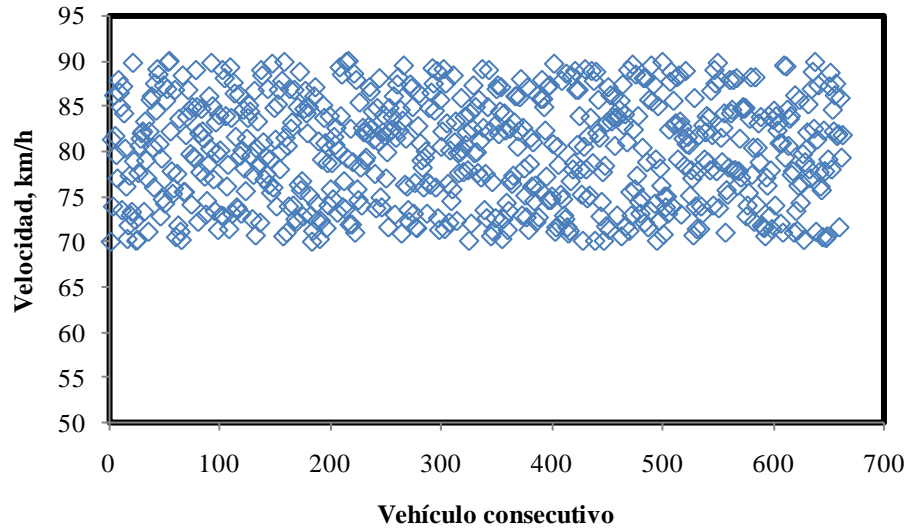


Figura 4-18: Dispersión simulada de la velocidad de los vehículos tipo C2.

Para los datos medidos y simulados, la Figura 4-19 muestra la dispersión de la energía almacenada en el pavimento para los diferentes vehículos tipo C2.

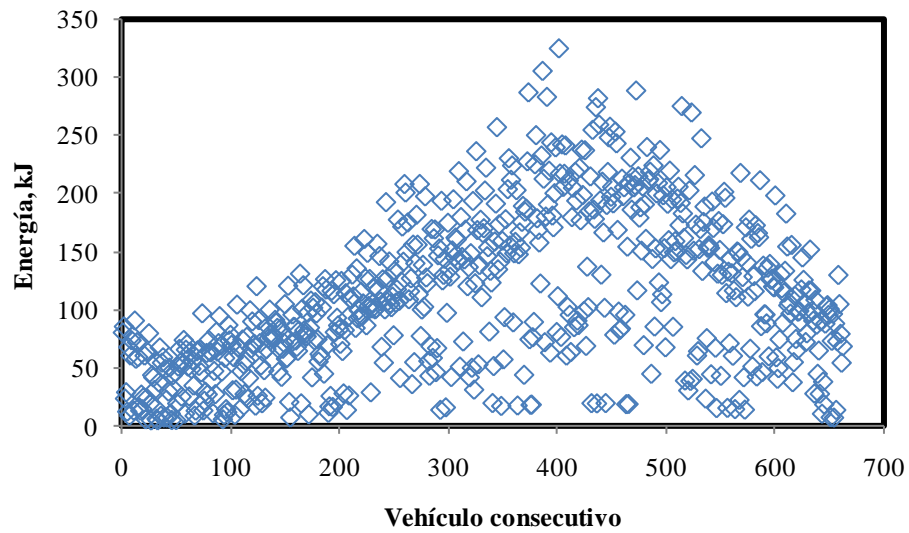


Figura 4-19: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C2.

Los resultados de la Figura 4-19 señalan que la máxima cantidad de energía fue de 325 kJ y la mínima de 5.1 kJ, esto es, una relación de 63 a 1. La condición de mayor energía almacenada en el pavimento correspondió a un vehículo que circuló a una velocidad de 89.7 km/h, con un PBV de 21.2 Ton y una temperatura del pavimento de 25.7 °C. La situación menos agresiva para con el pavimento se dio para un vehículo con una velocidad de 80.6 km/h, con un PBV de 5 Ton y una temperatura del pavimento de 11 °C.

Finalmente, para este vehículo, la Figura 4-20 muestra las desviaciones estándar para las diferentes características del uso de la infraestructura y de la energía almacenada resultante. Se puede observar en esta figura el efecto magnificador de la energía de deformación, a partir de las relativamente pequeñas variaciones de las otras tres características.

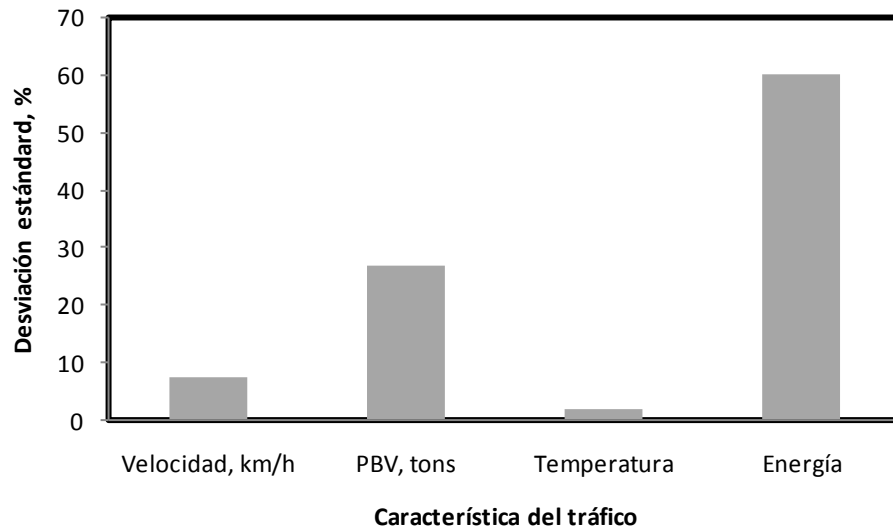


Figura 4-20: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C2, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

4.3.2.2 Vehículo unitario C3

La Figura 4-21 muestra los valores de PBV de los vehículos C3 en el tráfico medido, los cuales indican un porcentaje de sobrecarga respecto al valor vigente de PBV máximo permitido en caminos tipo A (SCT,

2008). Las variaciones de la temperatura del pavimento y de la velocidad de circulación son cantidades simuladas en este trabajo, las cuales siguen una variación semejante a la expuesta para el vehículo C2 (Figuras 4-17 y 4-18).

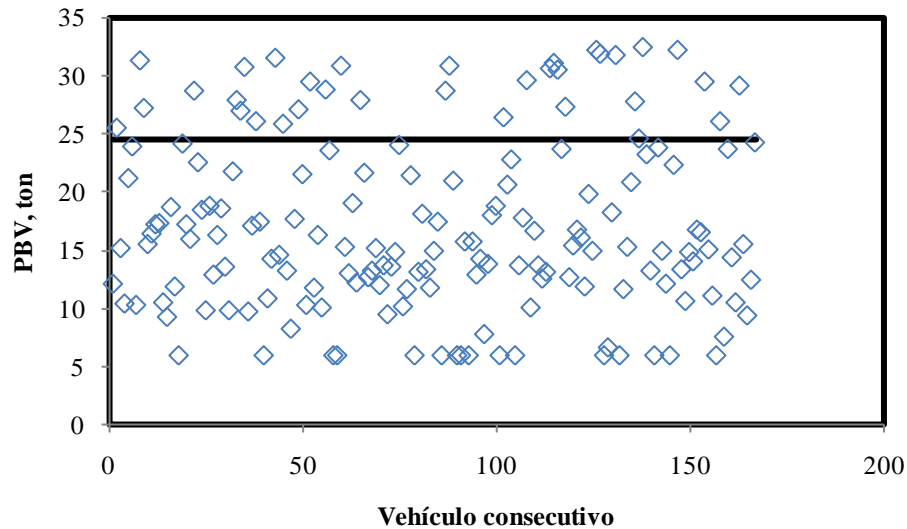


Figura 4-21: Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo C3 medidos en México por el IMT.

La Figura 4-22 muestra ahora la energía almacenada calculada en el pavimento por efecto del paso de los vehículos tipo C3. El valor máximo de la energía es de 581 kJ y ocurre para un vehículo que circula a 85.1 km/h, con una carga de 32.2 Ton y con el pavimento a 26 °C.

En cuanto a la situación menos agresiva para con el pavimento (de 5 kJ) en este flujo de vehículos tipo C3, corresponde a un vehículo que circuló a 77.3 km/h, con PBV de 6 Ton y con una temperatura del pavimento de 11.1 °C. De esta forma, la relación entre la situación más agresiva y la menos agresiva es de 114 a 1.

Por el lado de la dispersión de las diferentes propiedades y características de este flujo vehicular, la Figura 4-23 muestra estas desviaciones estándar. En este caso, la dispersión alcanza hasta un 100% para la energía almacenada.

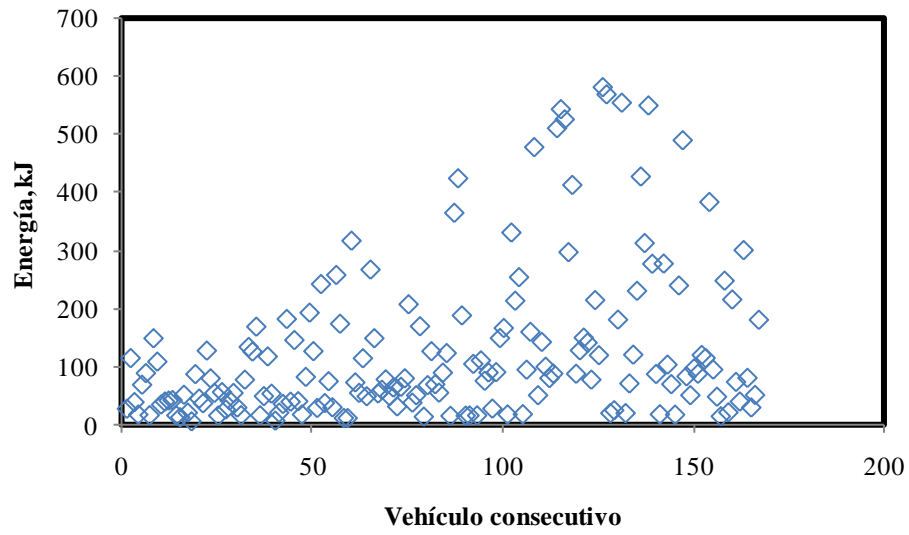


Figura 4-22: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo C3.

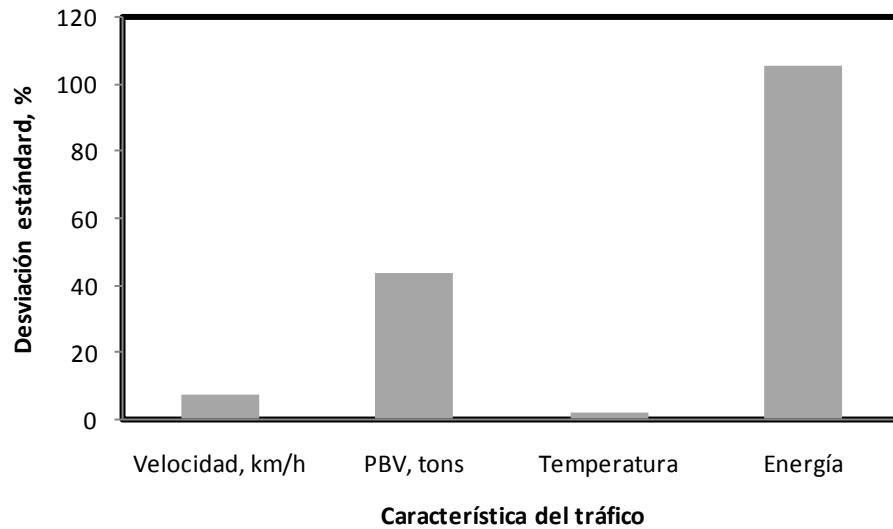


Figura 4-23: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo C3, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

4.3.2.3 Vehículo articulado T3-S2

Las Figura 4-24 muestra el PBV del flujo de vehículos tipo T3-S2, en el cual se identifica un porcentaje de sobrecarga del orden del 15% y alcanza valores hasta de 20% por encima del peso autorizado para estos vehículos durante la realización del estudio. También se muestra el PBV máximo autorizado en la actualidad, de 41.5 Ton (SCT, 2008).

La Figura 4-25 muestra las energías asociadas al tráfico descrito en la Figura 4-24. En este caso, la máxima energía almacenada en el pavimento fue de 890 kJ y la mínima energía fue de 28.78 kJ, lo que representa una relación de 31 a 1.

La situación menos agresiva para con el pavimento, se dio con un vehículo que circuló a 73.3 km/h, con un PBV de 18.7 Ton y una temperatura del pavimento de 11°C. En cuanto a la situación más agresiva, ésta se dio con un vehículo a una velocidad de 79.4 km/h, con una carga de 52 Ton y el pavimento a 26°C.

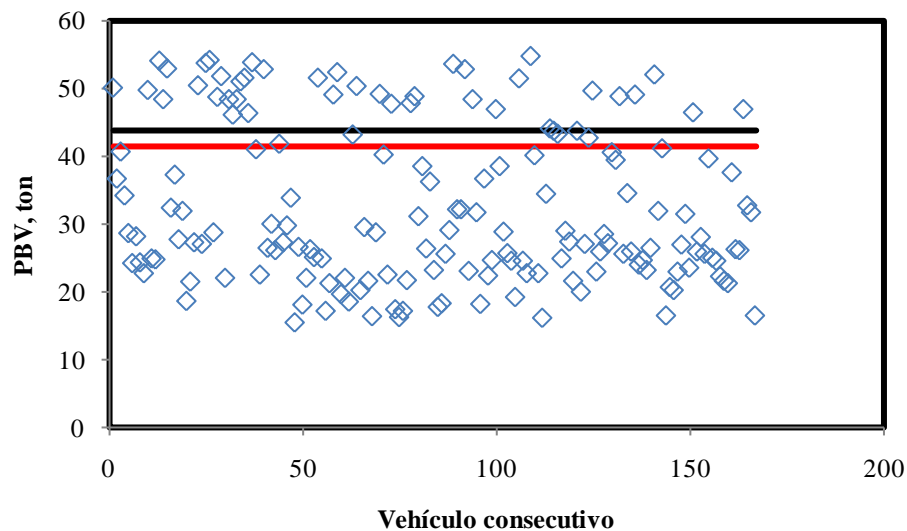


Figura 4-24: Dispersión en los valores del PBV de los vehículos tipo T3-S2 medidos en México por el IMT.

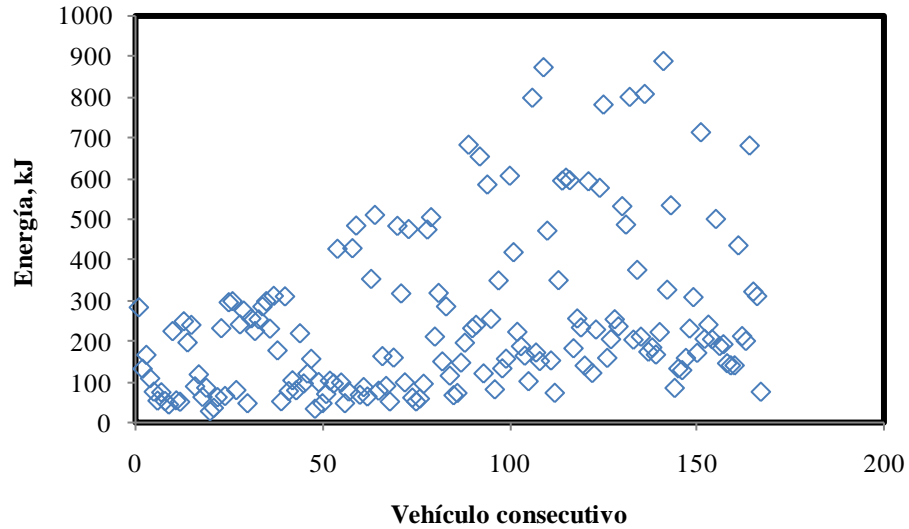


Figura 4-25: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T3-S2.

La dispersión de las diferentes cantidades simuladas y medidas, se presenta en la Figura 4-26. La dispersión de la energía es 2.2 veces mayor con respecto al PBV.

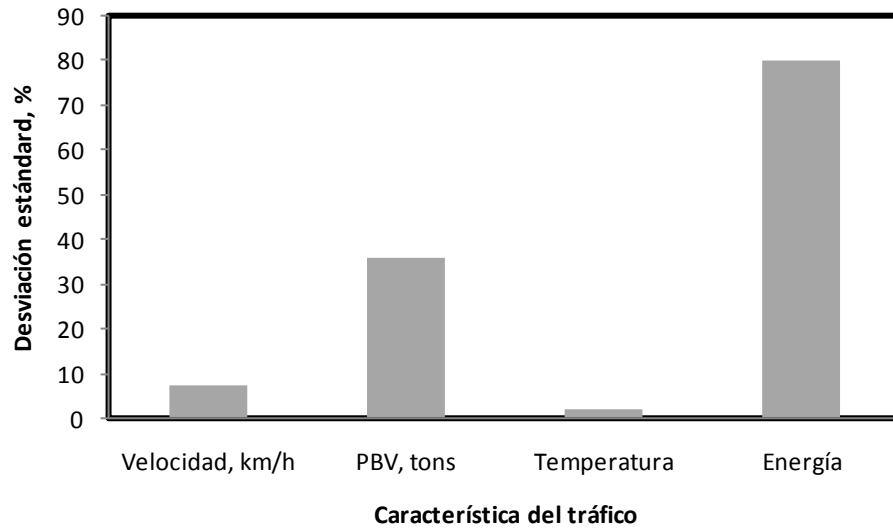


Figura 4-26: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T3-S2, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

4.3.2.4 Vehículo articulado T3-S3

La Figura 4-27 muestra el PBV del flujo de vehículos tipo T3-S3. Se observa alguna cantidad de vehículos sobrecargados, al comparar su PBV con el PBV máximo permitido en aquella época (48 Ton), que es el mismo permitido actualmente (SCT, 2008). En la Figura 4-28 se muestran los resultados en cuanto a la energía almacenada en el pavimento. En este caso, la máxima cantidad de energía para un vehículo en particular fue de 971 kJ, con una mínima de 33 kJ, lo que representa una relación de 28.8 a 1. El vehículo que resultó más agresivo para con el pavimento fue uno que circuló a 77.7 km/h, con un PBV de 59.8 Ton sobre un pavimento a 25.8 °C.

La condición menos agresiva para con el pavimento fue un vehículo con una velocidad de 84.9 km/h, con un PBV de 21.8 Ton sobre un pavimento a 11.8 °C.

Las dispersiones correspondientes a los valores de operación del vehículo T3-S3 y a la energía de deformación, se muestran en la Figura 4-29.

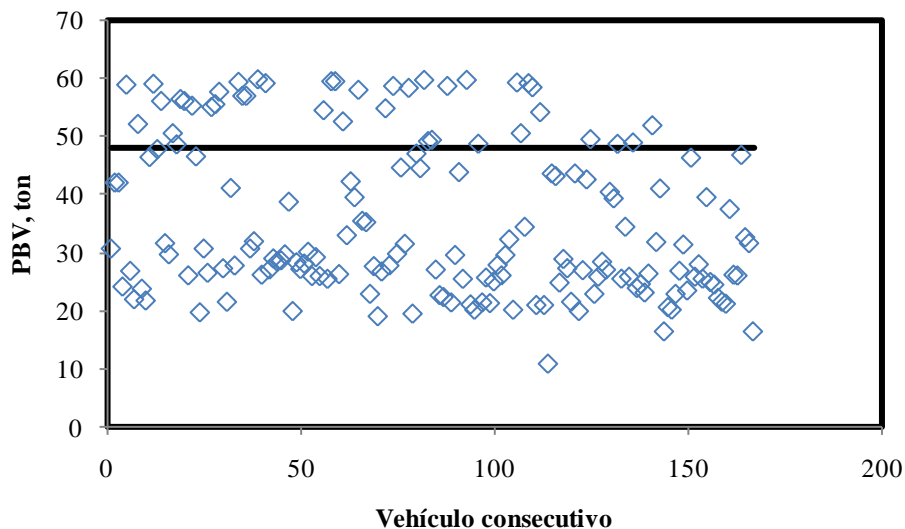


Figura 4-27: Dispersión de los valores del PBV de los vehículos tipo T3-S2 medidos en México por el IMT.

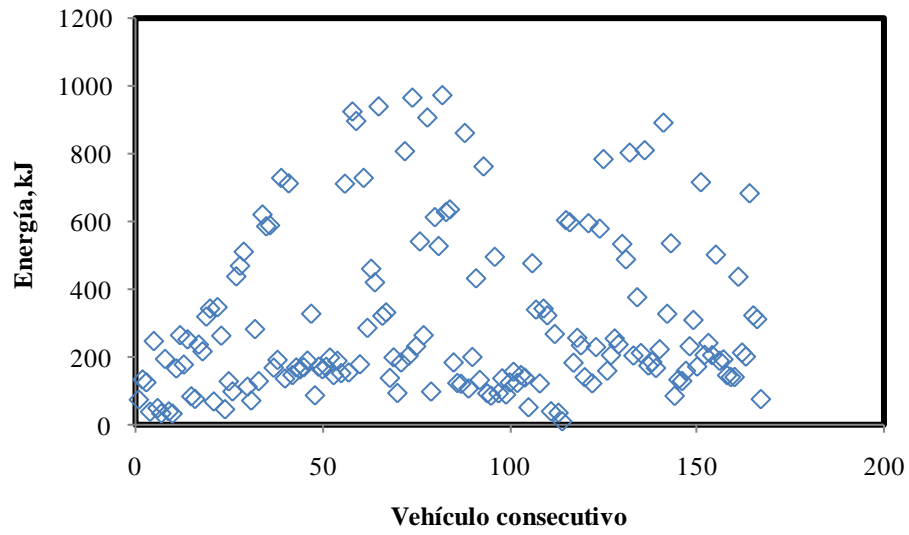


Figura 4-28: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento para el tráfico medido de vehículos tipo T3-S3.

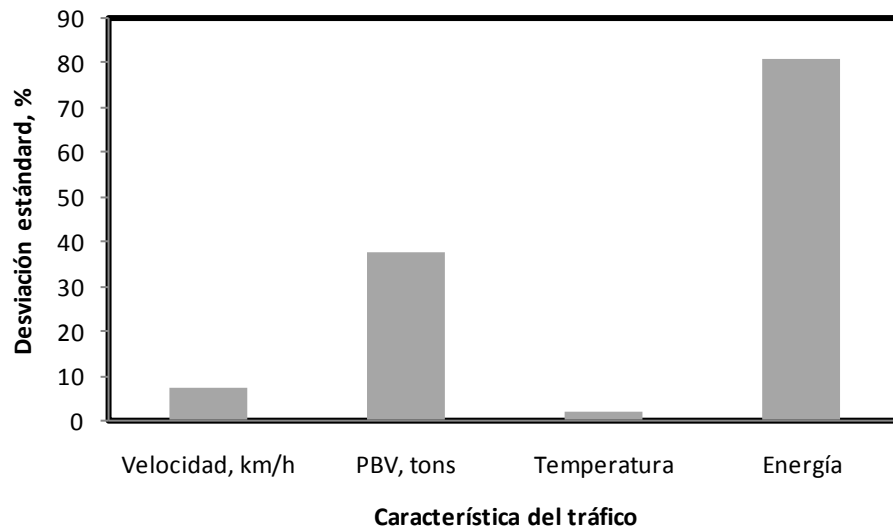
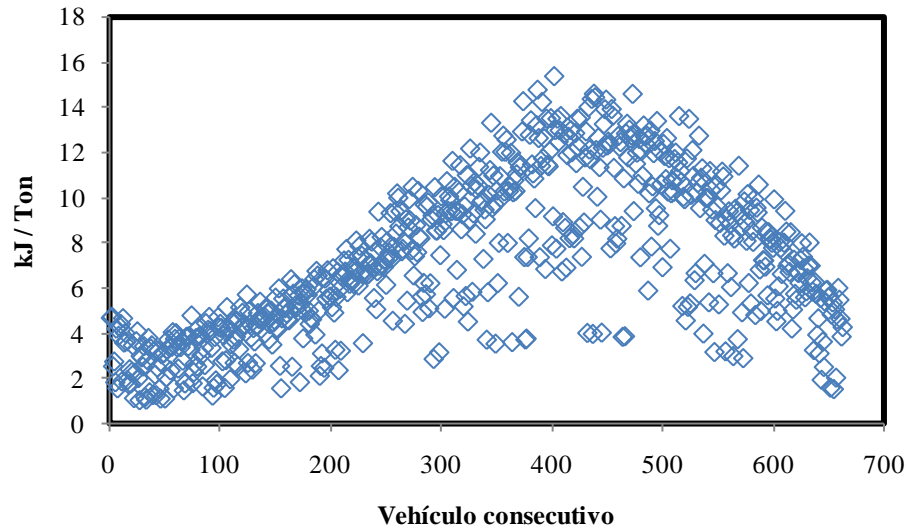


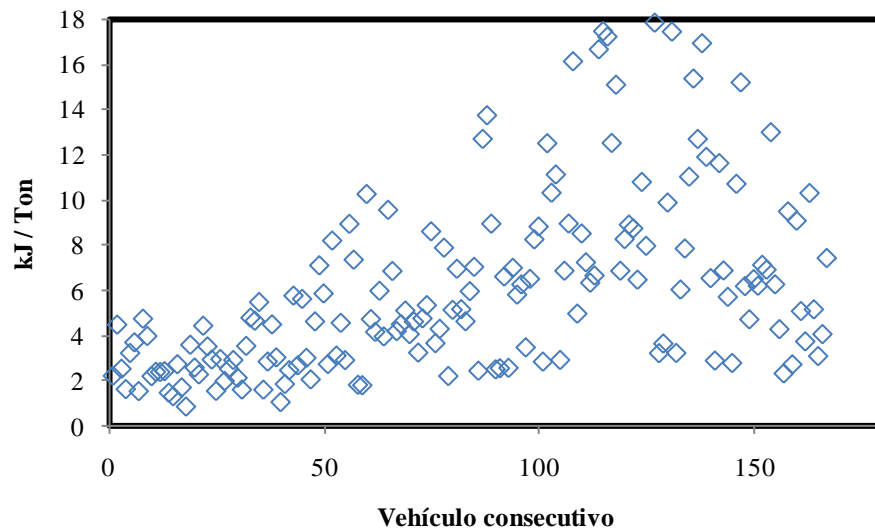
Figura 4-29: Desviaciones estándar de las características del flujo de vehículos tipo T3-S3, normalizada al valor promedio de estas propiedades.

4.3.2.5 Energía específica por Ton de PBV

Ahora se presentan los resultados en cuanto a las energías almacenadas en el pavimento por cada Ton de PBV de los vehículos. Estos resultados se muestran en la Figura 4-30 para cada uno de los vehículos en el tráfico medido.

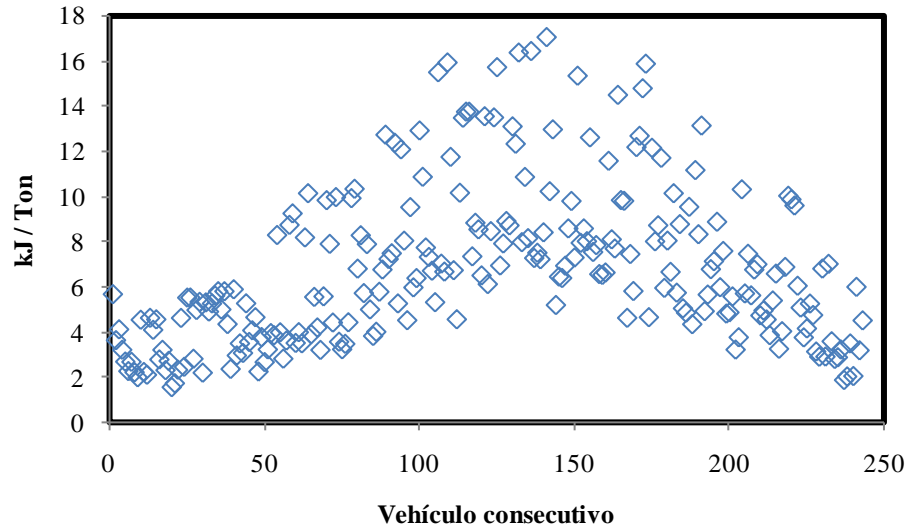


(a) Vehículo C2

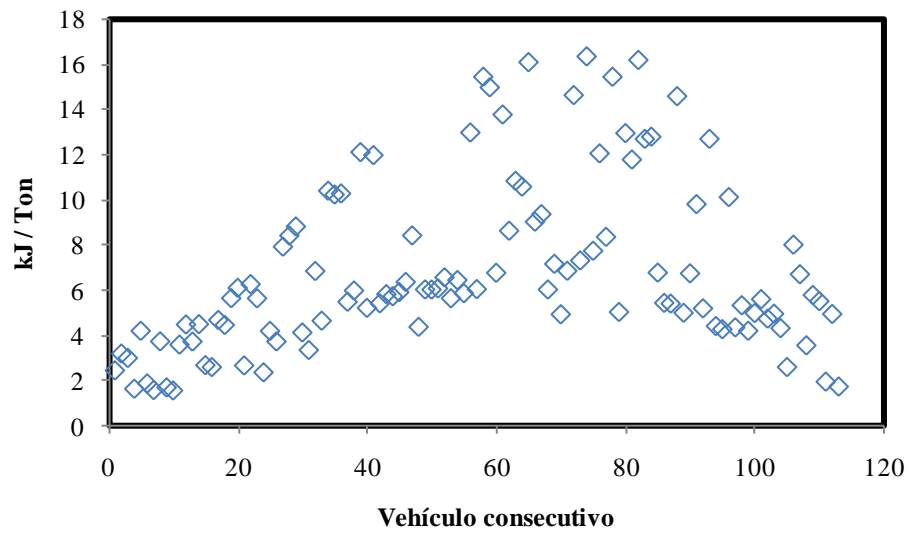


(b) Vehículo C3

Figura 4-30: Dispersiones de la energía específica almacenada en el pavimento por cada Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos tipo: (a) C2 y (b) C3.



(c) Vehículo T3-S2



(d) Vehículo T3S3

Figura 4-30: (Cont.) Dispersiones de la energía específica almacenada en el pavimento por cada Ton de PBV para el tráfico de vehículos tipo: (c) T3-S2 y (d) T3-S3.

La Figura 4-31 muestra el resumen de los valores de energía almacenada por cada Ton de PBV. De acuerdo con estos resultados, el vehículo tipo C2 causaría el máximo daño a los pavimentos, con aproximadamente 20% mayor que el vehículo C3 y un 10% mayor que los vehículos T3-S2 y T3-S3.

El vehículo que menor daño causaría a los pavimentos por Ton de PBV, corresponde al C3.

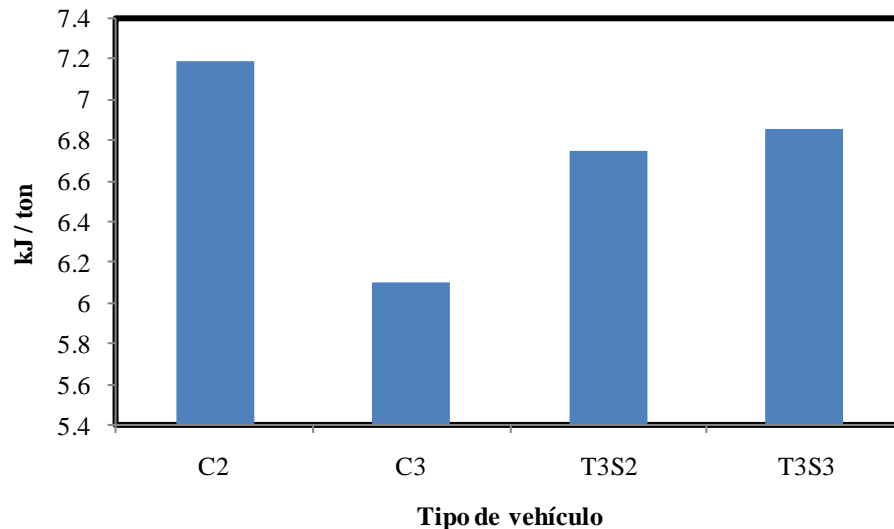


Figura 4-31: Energía almacenada promedio por Ton de PBV para el tráfico medido de vehículos.

4.3.3 Aplicación a flujo vehicular medido en México con diferente rugosidad del pavimento

En esta sección se concentra el análisis en el efecto de la rugosidad sobre los valores de la energía almacenada, como una función del tipo de vehículo, para el flujo vehicular considerado en la sección anterior. En particular, todas las otras condiciones que afectarían la interacción vehículo-pavimento se toman como parámetros. Este es el caso de la temperatura del pavimento (10 °C), así como las propiedades de la mezcla asfáltica (Índice de penetración; volumen de huecos; y temperatura de suavización del asfalto), además de la velocidad de circulación de los vehículos (80 km/h). Las pruebas se efectúan con diferentes perfiles de pavimento, los cuales coinciden con aquellos empleados en el Capítulo 3 de Simulación de la Interacción Vehículo-Pavimento.

La Figura 4-32 ilustra el efecto de la rugosidad del pavimento sobre los montos de energía almacenada, como una función del tipo de vehículo. Estos resultados muestran tendencias contradictorias. Mientras que la energía disminuye con la rugosidad del pavimento en el caso de los vehículos tipo C2, T3-S2 y T3-S3, ocurre lo contrario en el caso del vehículo C3.

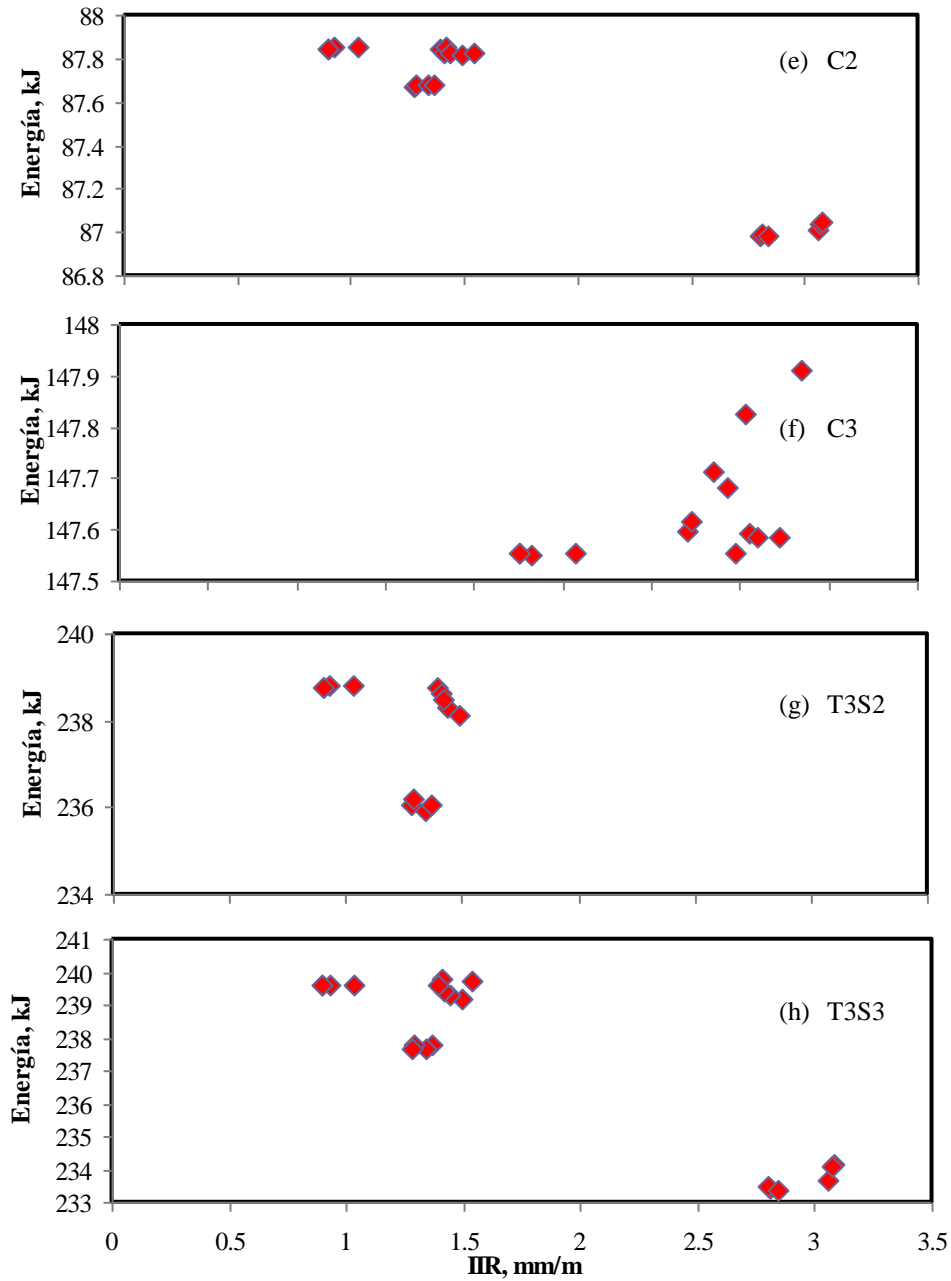


Figura 4-32: Efecto de la rugosidad del pavimento sobre la cantidad de energía almacenada, como una función del tipo de vehículo.

Estas tendencias fueron las que se observaron en el análisis paramétrico de la sección 3.4 del Capítulo 3. De esta forma, el contenido espectral de los pavimentos afectaría de manera sensible la respuesta de los vehículos. Por otro lado, la relación cuadrática entre la energía almacenada en el pavimento y las fuerzas de las llantas en el pavimento, podría estar implicada en el fuerte efecto de las fuerzas menores, elevadas a la cuarta potencia. Esto ha sido sugerido previamente (Romero, 2000).

Se efectúa ahora un análisis de las dispersiones en las energías almacenadas en el pavimento, por efecto de la rugosidad del pavimento. De esta manera, los flujos de cada uno de los vehículos se simularon para cada uno de los perfiles de pavimento. A su vez, se agruparon los valores máximos y mínimos de la energía almacenada en el pavimento para cada uno de los niveles de rugosidad considerados.

La Figura 4-33 muestra la dispersión de las energías almacenadas en términos de los valores máximos y mínimos obtenidos, como una función de la rugosidad del pavimento y el tipo de vehículo. Estos resultados sugieren que el rango de variación para cada nivel de rugosidad del pavimento, depende del perfil del pavimento y del tipo de vehículo empleado. En particular, se observa que la dispersión menor la presenta el vehículo tipo T3-S3 al considerar valores altos de rugosidad.

La Figura 4-34 muestra los cocientes de las máximas energías almacenadas entre las mínimas energías almacenadas, como una función de la rugosidad del pavimento. De acuerdo con estos resultados, existe una tendencia mixta en cuanto al efecto de la rugosidad sobre los valores de dispersión de la energía almacenada. Como se ha señalado líneas arriba, el vehículo tipo T3-S3 es el que presenta una menor sensibilidad al considerar niveles altos de rugosidad.

Las dispersiones en los valores de la energía almacenada por efecto de la rugosidad del pavimento, serían el resultado de la combinación de los niveles de carga y de la velocidad de circulación, dado que los otros parámetros se han tomado como constantes.

La Figura 4-35 muestra los valores de las energías almacenadas en el pavimento, como una función de la rugosidad del pavimento, para todos los vehículos considerados. La Figura 4-36 muestra los valores máximos de las relaciones entre la máxima y la mínima energía de deformación almacenada en el pavimento, para los diferentes vehículos del flujo medido.

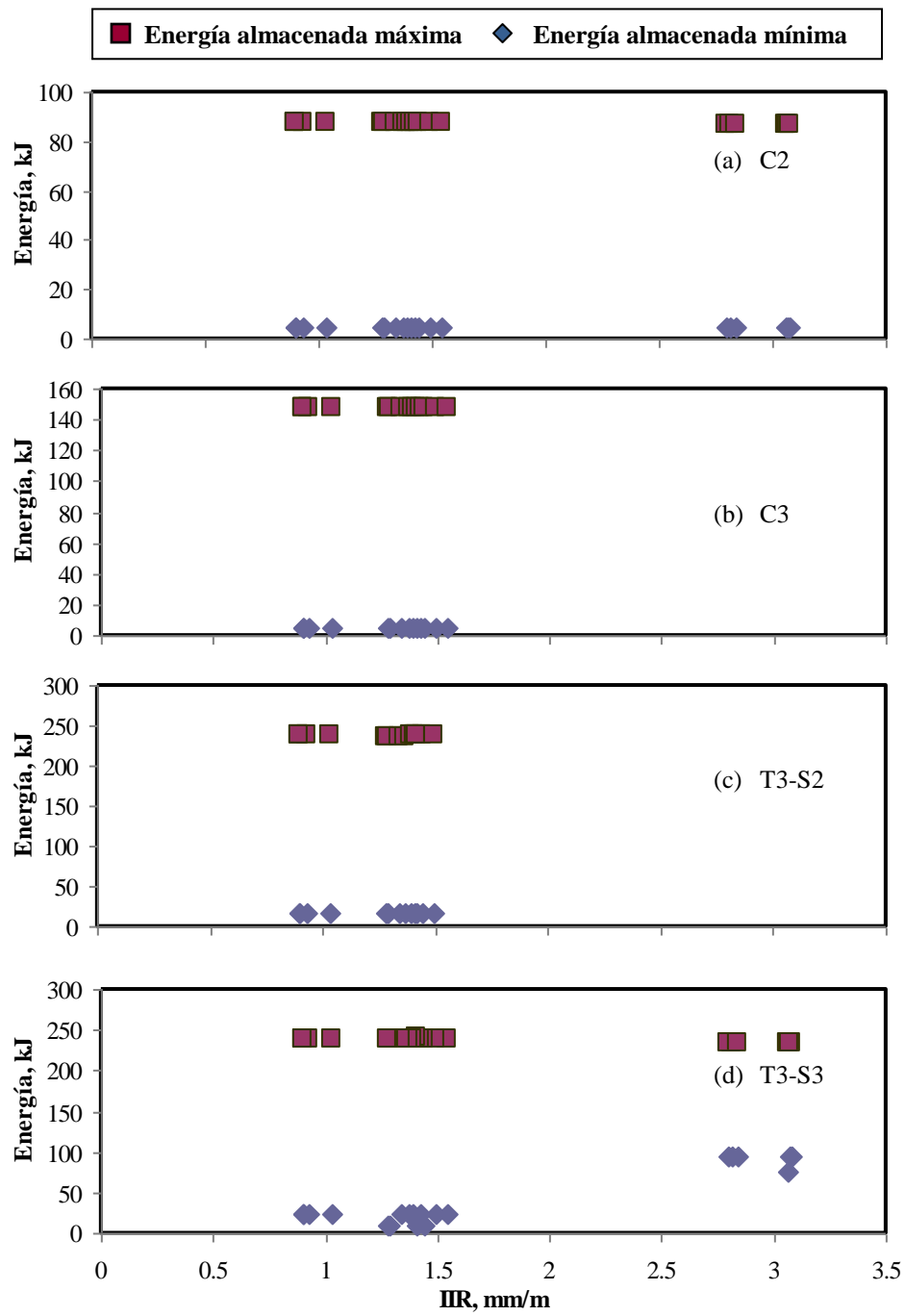


Figura 4-33: Dispersión de la energía almacenada en el pavimento en términos de los valores máximos y mínimos obtenidos, como una función de la rugosidad y del tipo de vehículo.

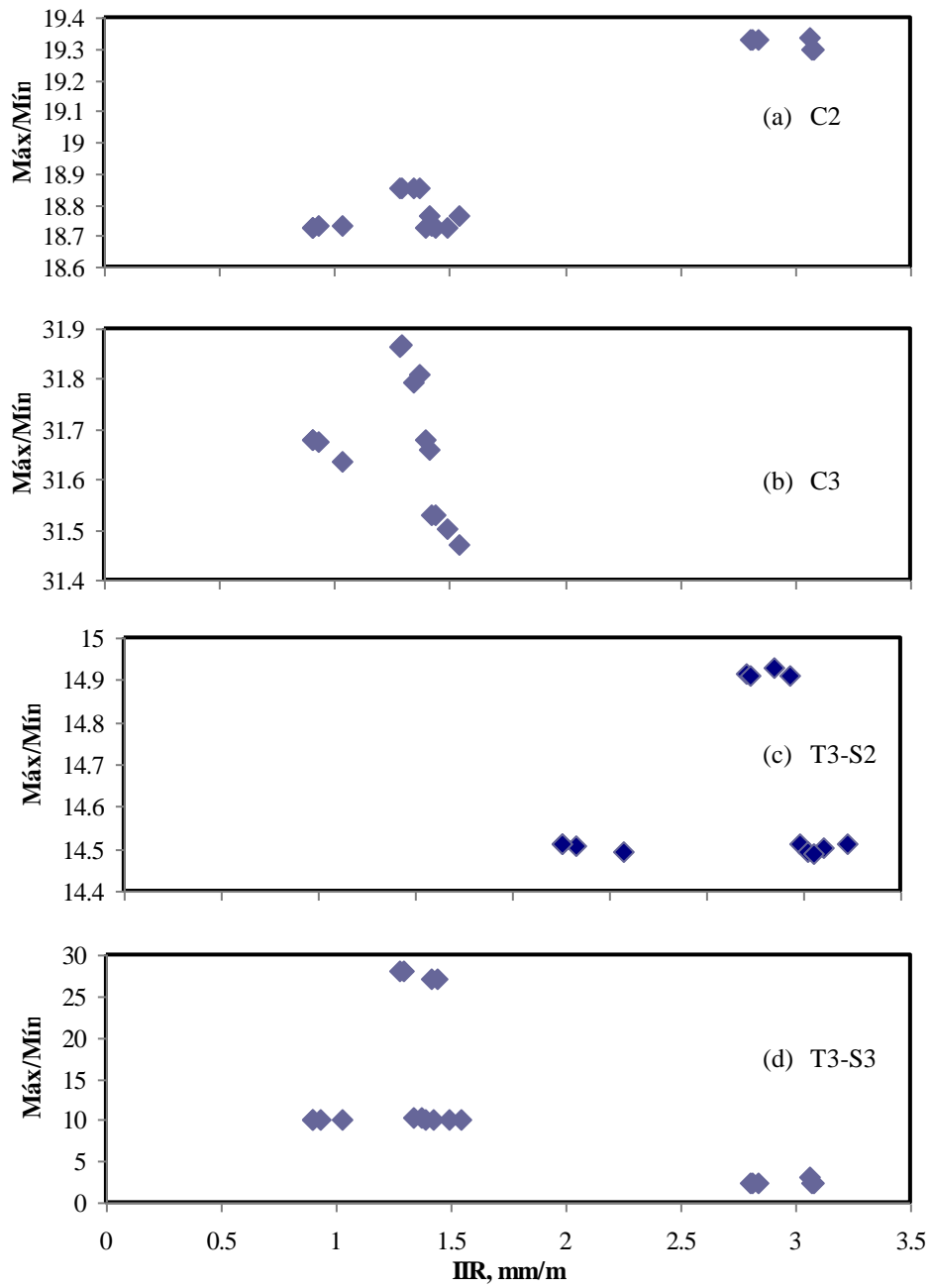


Figura 4-34: Efecto de la rugosidad sobre los valores máximos y mínimos de la energía almacenada en el pavimento.

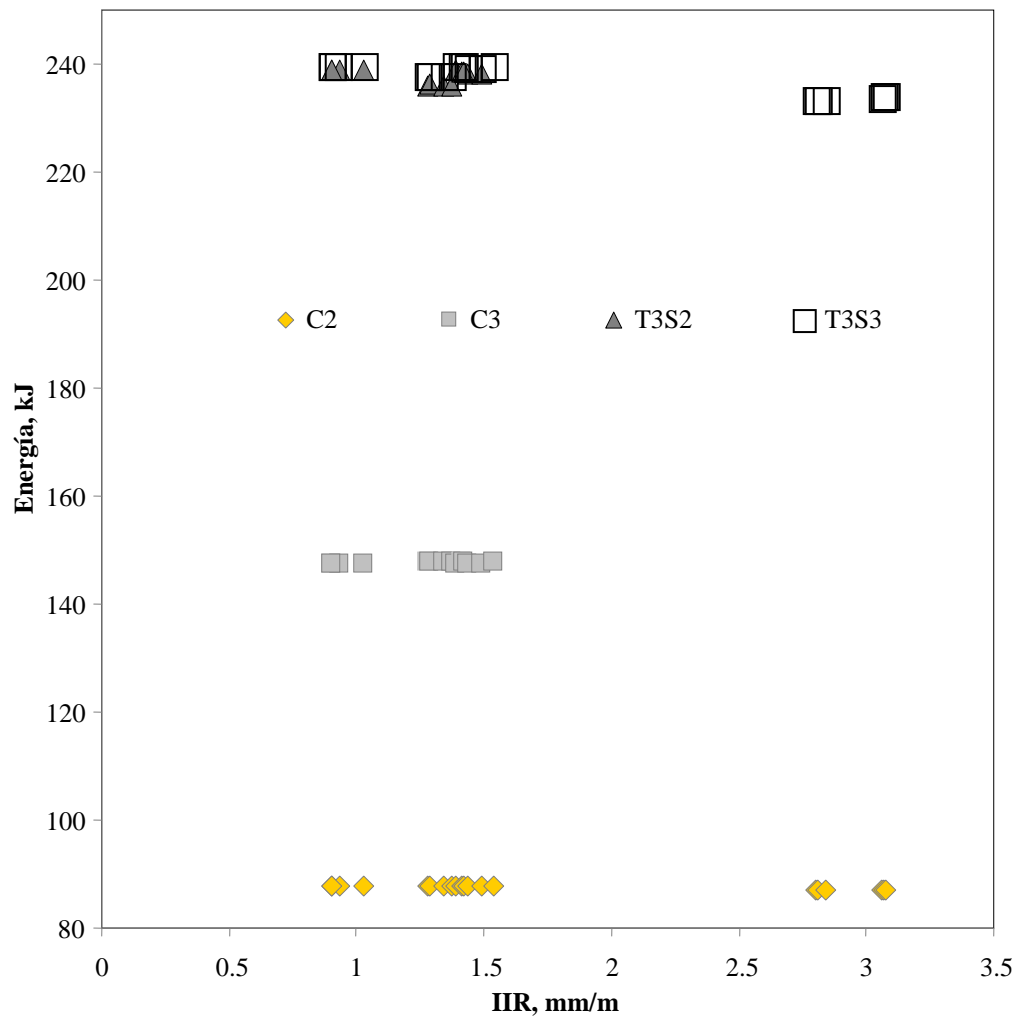


Figura 4-35: Dispersión de las energías almacenadas en el pavimento como una función del tipo de vehículo y de la rugosidad del pavimento.

Los valores mostrados en la Figura 4-36 indican que el vehículo que mayor dispersión presentó en los resultados de la Figura 4-34, fue el tipo C3. A su vez, el vehículo T3-S2 fue el que presentó la dispersión menor para las condiciones de simulación del flujo vehicular considerado. Es importante destacar que estos resultados toman en cuenta tanto las energías de deformación lineal como las de torsión.

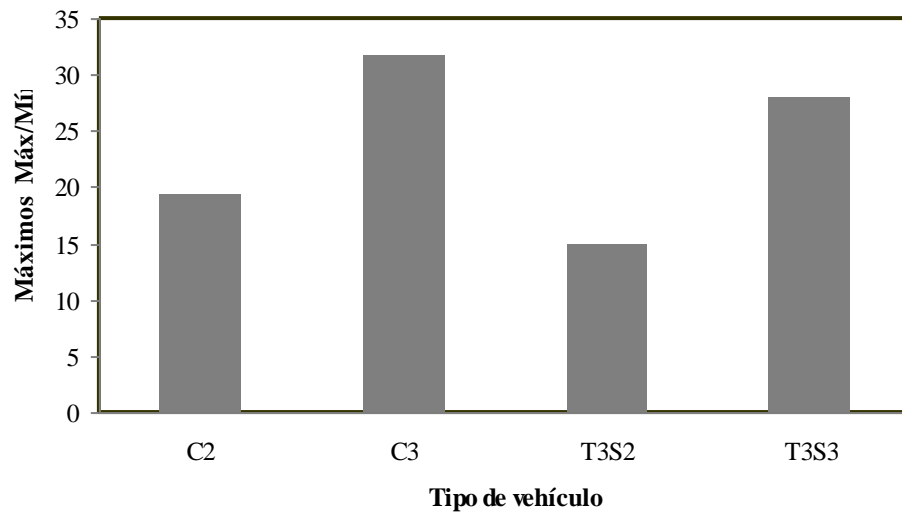


Figura 4-36: Valores máximos de los cocientes de máximas energías entre mínimas energías almacenadas en el pavimento.

4.3.4 Comparación del efecto de flujos vehiculares medidos en México y Francia

La Figura 4-37 muestra las relaciones específicas de la energía almacenada en el pavimento. En general, los vehículos en Francia transmitirían menos energía al pavimento por Ton de PBV. Sin embargo, sólo con el vehículo tipo C2 se puede efectuar un análisis comparativo. Dicho análisis, revela que este vehículo provoca acumulaciones 4.27 veces mayores en México que en Francia.

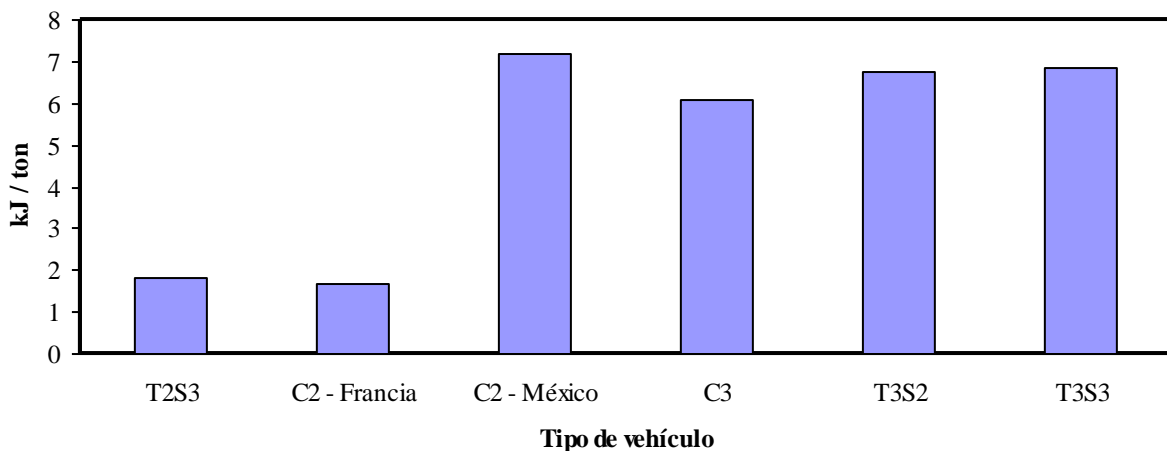


Figura 4-37: Relaciones promedio de energía entre PBV, para los vehículos en el tráfico medido en Francia.

Este incremento del efecto dañino del tráfico en México para este tipo de vehículo (C2), se atribuye a factores fundamentales y secundarios. Por el lado de los fundamentales, se tiene que el vehículo C2 en Francia circuló en la muestra analizada cuando el pavimento se encontraba a una temperatura promedio menor de solo 5.63 °C, mientras que en México esa temperatura promedio fue de 20.5 °C. Por otro lado, el PBV promedio del vehículo C2 mexicano fue de 14.37 Ton, contra 11.84 Ton en el caso del vehículo C2 francés, lo que representa un incremento de 21% del vehículo mexicano respecto al francés. La velocidad promedio en el caso de Francia también favorece una menor agresividad de los vehículos para con el pavimento, esto es, 88.5 km/h en Francia contra 80 km/h simulada en México. Por lo cual, todos los factores apuntan hacia una mayor degradación del pavimento en el caso de México.

En cuanto a los factores secundarios que influirían en los valores de las energías, se tiene la distribución de la carga en el vehículo, que podría provocar cargas excesivas en alguno de los ejes, especialmente en el caso del tráfico mexicano.

4.4 Costos de mantenimiento específicos

Como se indicó en el Capítulo 2 de Revisión de la Literatura (punto 2.3, correspondiente a los Cargos por Uso de Infraestructura), para crear un esquema de asignación de costos en la medida del efecto producto del tráfico de vehículos pesados sobre el pavimento, se propuso que la cuantificación del daño de los pavimentos se establezca de acuerdo a un modelo validado, que permita la simulación masiva de vehículos pesados al circular por longitudes reales de pavimento. Esto se haría por medio del Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos por Vehículos Pesados propuesto en esta tesis, a través del cálculo de la energía almacenada en el pavimento para un cierto periodo de tiempo y asociada al paso de los vehículos en la longitud normalizada de 136 metros. De esta forma, la energía almacenada en esta longitud podrá ser asociada a un tramo carretero de longitud real. A su vez, se mencionó que los costos totales de conservación y rehabilitación de los pavimentos se asignen al daño que los vehículos generen en dichas infraestructuras. Por lo tanto, al dividir estos montos entre las cantidades de energías totales obtenidas por medio del coeficiente, se establecería la relación entre el costo de mantenimiento de los pavimentos y la Ton de PBV de los vehículos, de tal suerte que se podría asignar a cada vehículo un costo por el daño inducido a la infraestructura.

Esta metodología se aplica para los flujos simulados en pavimentos con rugosidad cero, trabajados en la sección 4.3.2 de este capítulo y que involucran los flujos vehiculares medidos en México. Esto con el fin de evitar el complicado efecto de la rugosidad del pavimento sobre la respuesta de los vehículos y el efecto potencial sobre el pavimento. A su vez, ahora se considera una longitud del pavimento de 100 km.

4.4.1 Costo por energía de deformación

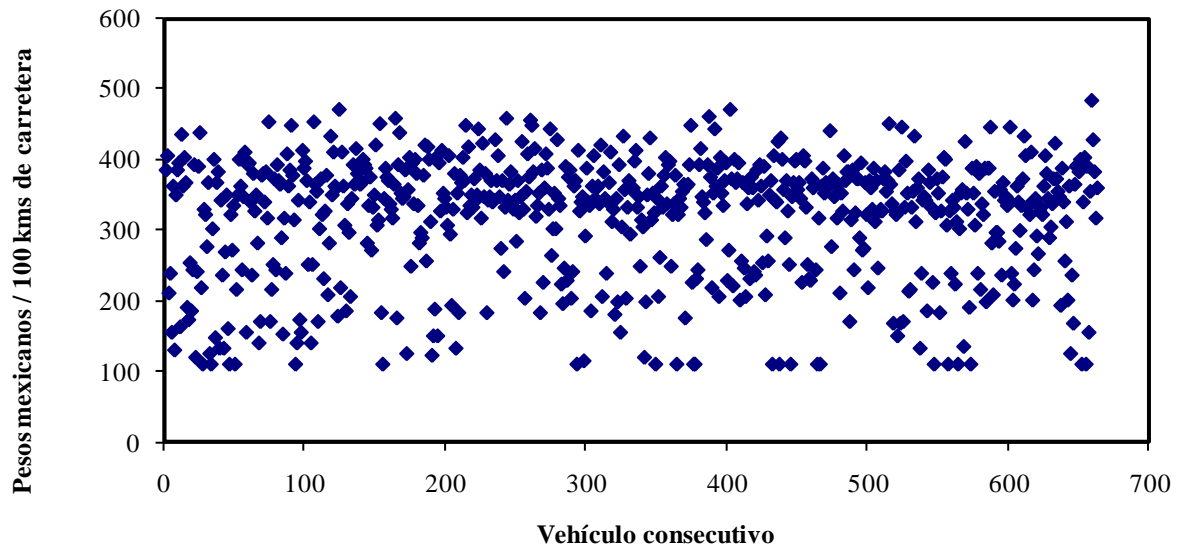
Se asume que la mayor parte del daño del pavimento se debe al paso de los vehículos pesados, además de tomar en cuenta la relación que guarda la energía almacenada en el pavimento con el daño potencial del mismo, planteada en el capítulo anterior. De esta forma, los costos totales de conservación de un segmento carretero, estarían asociados a la agregación de la energía que se almacena en el pavimento durante el paso del tráfico medido. Como referencia, los costos de conservación bianual de los pavimentos se estiman en un millón de pesos por cada kilómetro de carretera por cada carril (Rico *et al.*, 1998B). Adicionalmente, se asume que el tráfico medido en los caminos de México es representativo del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) para este nivel de costos.

Con base en estas asunciones, la Figura 4-38 muestra la dispersión en los costos por concepto de la reparación del daño de pavimentos producto del flujo mostrado, en función del tipo de vehículo en el tráfico. Estos cálculos se efectuaron de la siguiente manera:

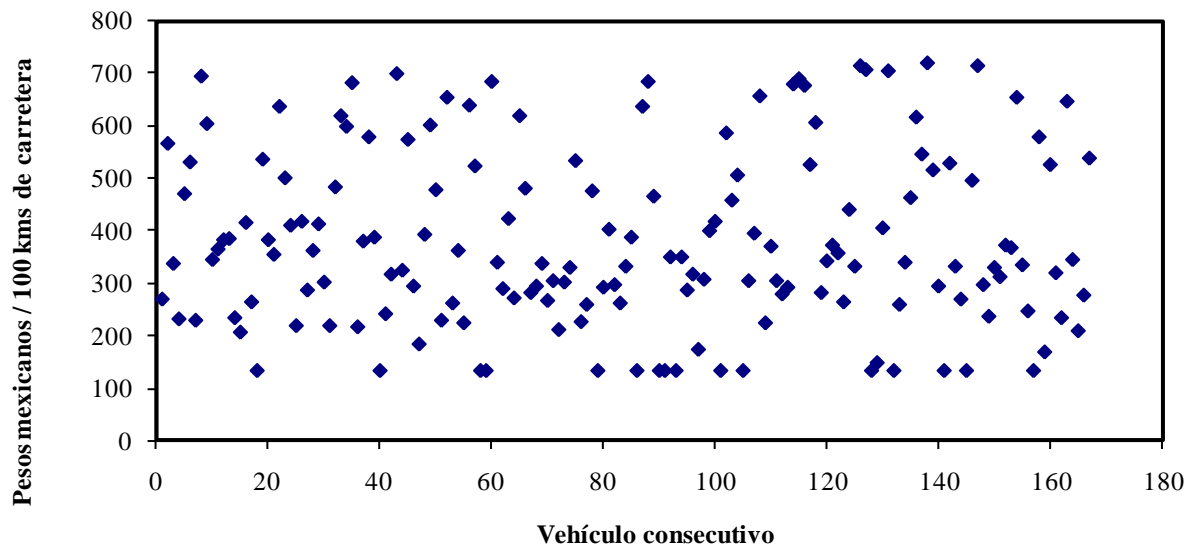
- 1) Se calculó el total de Ton de PBV para cada uno de los tipos de vehículos en el tráfico;
- 2) Se obtuvo el tonelaje de PBV en el tráfico;
- 3) Se simuló el paso de los vehículos por el tramo carretero, para obtener el total de kJ;
- 4) Se obtuvo la relación de kJ por cada Ton de PBV en el tráfico total;
- 5) Se dividió el costo total de mantenimiento por cada Ton de PBV;
- 6) Se dividió el costo por Ton entre los kJ por Ton, para obtener el costo por cada kJ de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Costo en pesos}}{\text{kJ}} = \frac{\frac{\text{Costo en pesos}}{\text{Tonelada de PBV}}}{\frac{\text{kJ}}{\text{Tonelada de PBV}}} = 0.00022194 \quad (4.1)$$

- 7) Esta cantidad se aplicó a cada uno de los vehículos en el tráfico medido.

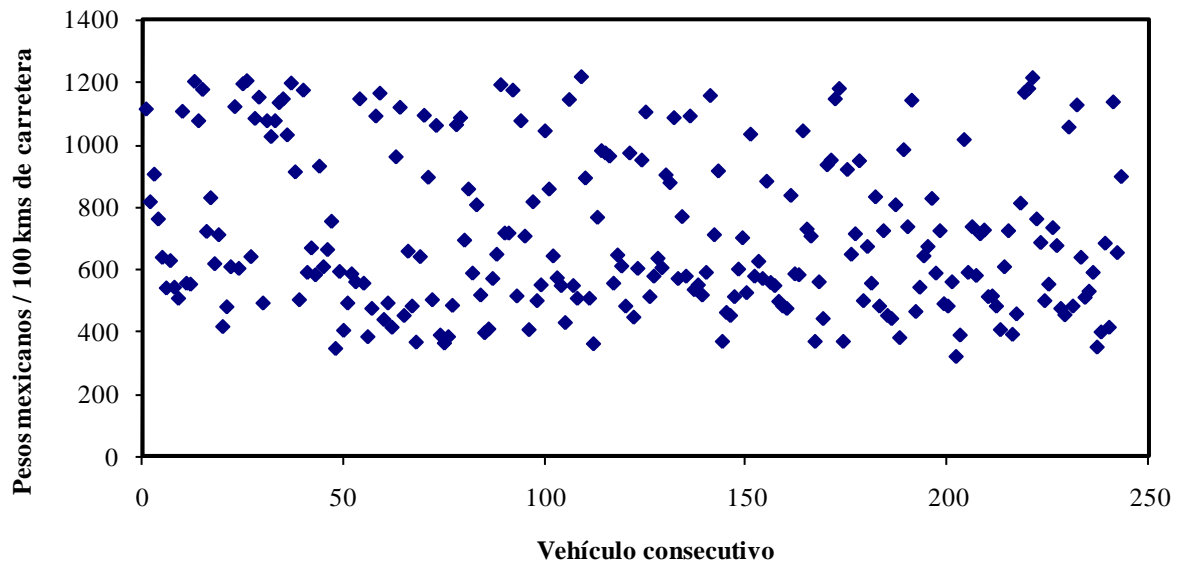


(a) Vehículo C2

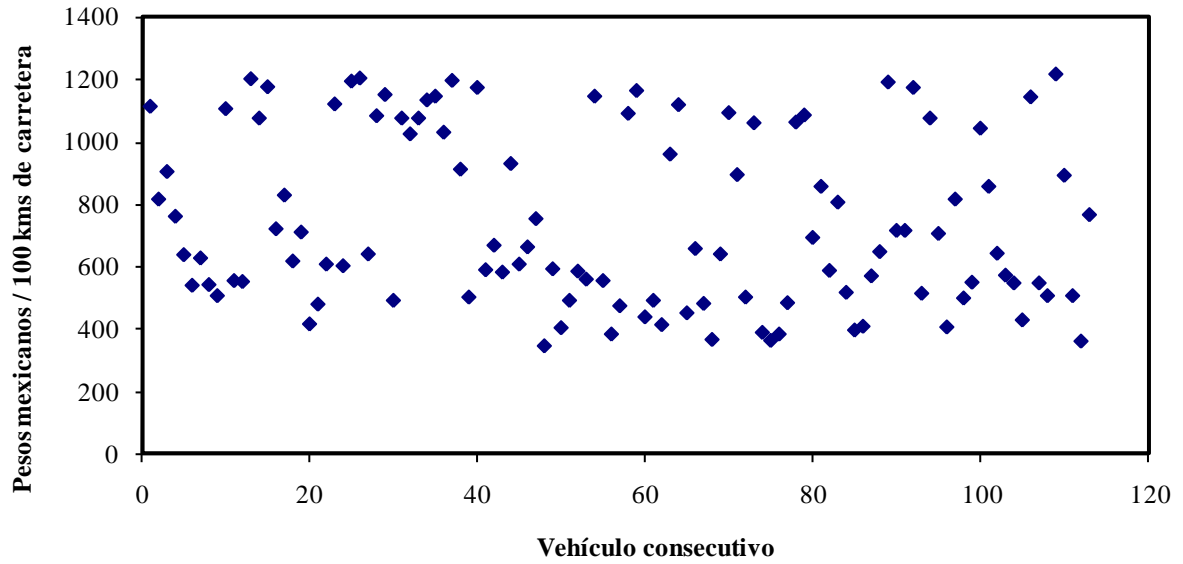


(b) Vehículo C3

Figura 4-38: Dispersión en los costos atribuibles a cada vehículo en el tráfico medido: (a) vehículos tipo C2 y (b) vehículos tipo C3.



(c) Vehículo T3-S2



(d) Vehículo T3-S3

Figura 4-38: (Cont.) Dispersión en los costos atribuibles a cada vehículo en el tráfico medido: (c) vehículos tipo T3-S2 y (d) vehículos tipo T3-S3.

Los resultados de la Figura 4-38, muestran una dispersión importante en los costos de mantenimiento asociados a cada uno de los vehículos dentro del tráfico. Esta dispersión se caracteriza ahora en términos de los valores máximos y mínimos de los costos asociados. Al respecto, la Figura 4-39 muestra los valores máximos y mínimos para cada tipo de vehículo. Esta figura revela que los valores máximos alcanzan 483, 719, 1215 y 1215 para los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 respectivamente. Los valores promedio de estos costos se presentan en la Figura 4-40, donde se observa que la relación máxima entre los valores máximo y mínimo, corresponde al vehículo tipo C3 con una relación mayor de 5. La menor de esta relación se observa en el caso del vehículo T3-S3, un poco mayor de 3.

Finalmente, la Figura 4-41 muestra la comparación del costo promedio para el flujo vehicular medido, con la tarifa de peaje vigente en la Caseta Tepetzotlán de la carretera México-Querétaro (CAPUFE, 2008). Es importante señalar que los costos calculados se han actualizado respecto a los 115 km que cubren el trayecto por el que se cobra en dicha caseta. Por otra parte, se señala también que las tarifas vigentes de esta carretera no reconocen ninguna diferencia entre los vehículos de 2 y 3 ejes, tampoco entre los vehículos con 4 y 5 ejes, ni con los de 6 y hasta 9 ejes.

Los resultados de la Figura 4-41 revelan que los montos cobrados en la carretera de Tepetzotlán son inferiores a los montos invertidos en conservación y mantenimiento. En el caso del vehículo T3-S2 se cobraría alrededor de la mitad del costo asociado al daño del pavimento.

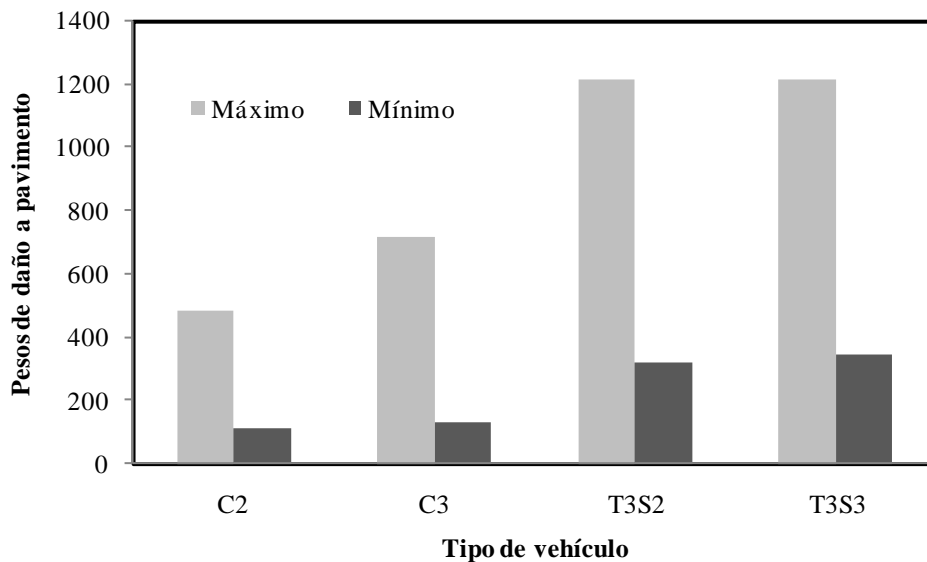


Figura 4-39: Costos en Pesos Mexicanos máximos y mínimos que se asocian a cada tipo de vehículo dentro del tránsito.

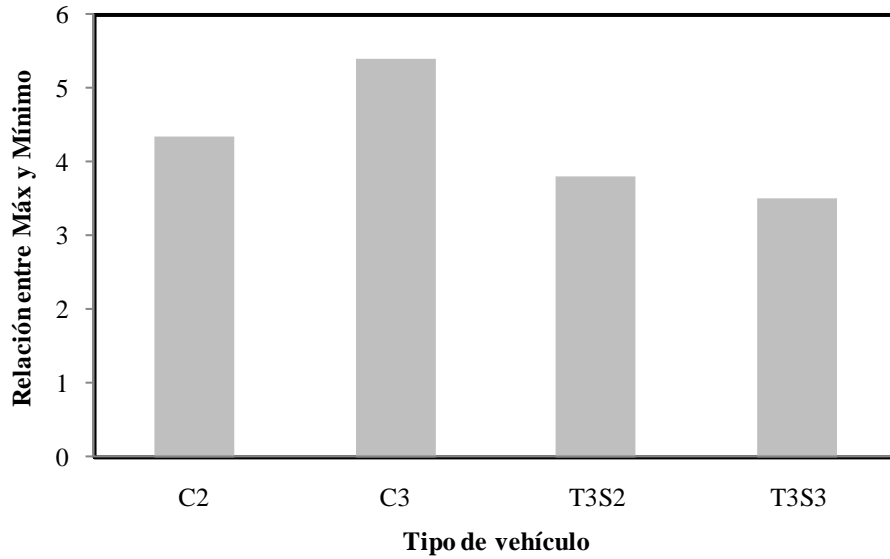


Figura 4-40: Relaciones entre los valores máximos y mínimos por tipo de vehículo.

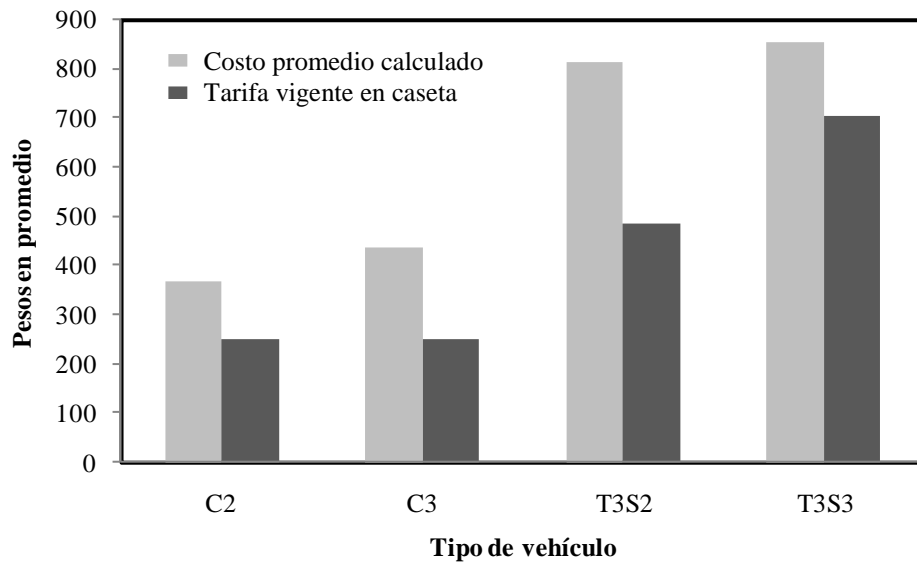


Figura 4-41: Costos promedio en Pesos Mexicanos que se asocian a cada tipo de vehículo dentro del tránsito, comparado con las tarifas vigentes en la Caseta Tepotzotlán de la carretera México-Querétaro.

4.4.2 Efecto de los pares de tracción

En esta sección se calcula el costo atribuible exclusivamente al efecto de los pares de tracción sobre el daño potencial del pavimento, en el tramo de cuota analizado en la sección anterior. Esto es, el segmento de 115 km de longitud que cubre el costo de peaje en la caseta de Tepetzotlán de la carretera México-Querétaro.

La metodología para realizar este cálculo se resume en los siguientes pasos:

- 1) Se estima el TDPA para el tramo carretero que cubre la caseta de Tepetzotlán;
- 2) Se estima el número de vehículos pesados por tipo dentro del TDPA;
- 3) Se calcula el costo promedio por concepto del daño producido en el pavimento, asociado a cada uno de los tipos de vehículos dentro del TDPA;
- 4) Se calculan los costos totales agrupados por tipo de vehículo;
- 5) Se estiman los porcentajes asociados al efecto de los pares de tracción por tipo de vehículo;
- 6) Se aplica el porcentaje, asociado al efecto de los pares de tracción por tipo de vehículo, a los costos totales por tipo de vehículo; y
- 7) El resultado obtenido es el costo asociado al efecto de los pares de tracción por día y por tipo de vehículo.

En el siguiente punto se describe el desarrollo general de estos pasos.

4.4.2.1 Costo asociado al efecto de los pares de tracción sobre el pavimento

El TDPA estimado en el 2008 para el tramo carretero de la caseta de Tepetzotlán fue de 43773 vehículos (DGST, 2008). Cabe mencionar que esta información es publicada cada año por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y cuya estimación se basa en los registros de las casetas de cobro. Debido a que la operación de estas infraestructuras exige un registro de ciertos parámetros, la información recopilada ofrece datos detallados tanto de los tipos de vehículos como de sus respectivos volúmenes (DGST, 2008). Sin embargo, esta información carece de

registros sobre las condiciones de operación de los vehículos, como por ejemplo el PBV (por mencionar una de las características elementales de los vehículos).

Por esta razón, para estimar el costo producto de los pares de tracción, se asume que el comportamiento general, en cuanto a las condiciones de operación de los vehículos pesados dentro del TDPA, es representativo del flujo vehicular analizado en el punto 4.3.2 de este capítulo. De esta forma, el costo promedio atribuible al daño del pavimento por cada uno de los tipos de vehículos está dado por la Figura 4-41, con costos de 360, 440, 820 y 850 pesos mexicanos, respectivamente para los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3. De acuerdo a las estadísticas de la DGST, la participación de estos tipos de vehículos en el TDPA del tramo carretero de la caseta de Tepotzotlán, son de 7.2, 5.5, 11.4 y 1.1 % para los vehículos C2, C3, T3S2 y T3S3, respectivamente. De acuerdo con esto, el TDPA de cada uno de los vehículos es: 3152 camiones C2; 2408 camiones C3; 4990 combinaciones T3-S2; y 482 combinaciones T3-S3.

Con base en esta información, es decir, en el costo promedio por tipo de vehículo y en el número de vehículos dentro del TPDA, se calcula el monto total atribuible al daño del pavimento producto del tráfico de vehículos pesados, el cual incluye los costos asociados a la energía producto de las fuerzas verticales y tangenciales. Al respecto, la Figura 4-42 muestra este monto total por día y tipo de vehículo.

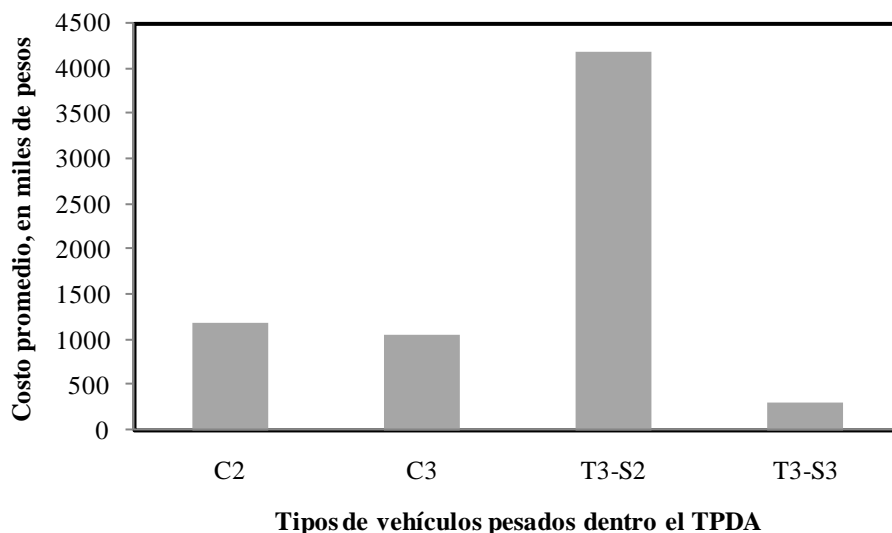


Figura 4-42: Monto total por día atribuible al daño del pavimento producto del paso de vehículos pesados en el tramo carretero de la Caseta Tepotzotlán.

Los porcentajes correspondientes al efecto de los pares de tracción por tipo de vehículo, son considerados de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis paramétrico desarrollado en el Capítulo 3. Al respecto, tales porcentajes corresponden a: vehículo tipo C2 con 1.57%; vehículo tipo C3 con 1.55%; vehículo tipo T3-S2 con 0.88%; y vehículo tipo T3-S3 con 1.64%. Estos porcentajes son aplicados a los montos mostrados en la Figura 4-42, para obtener el monto por tipo de vehículo asociado al efecto exclusivo de los pares de tracción. Tales montos son mostrados en la Figura 4-43.

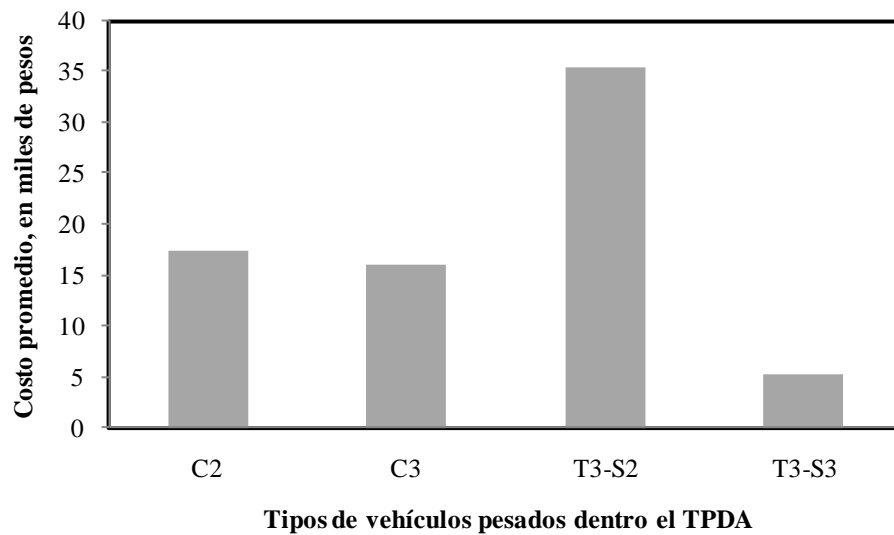


Figura 4-43: Monto total por día atribuible al daño del pavimento producto del efecto de los pares de tracción por el paso de vehículos pesados en el tramo carretero de la Caseta Tepetzotlán.

Cabe mencionar que los montos mostrados en la Figura 4-43 son producto de un solo día, debido a que hasta este momento se ha considerado únicamente el flujo vehicular expresado por el TDPA. Por lo tanto, para obtener los montos anuales asociados al efecto de los pares de tracción, se multiplica la suma de las cantidades correspondientes a cada tipo de vehículo por los 365 días del año. El monto total aproximado producto de esta operación, da como resultado arriba de 28 millones de pesos mexicanos anuales. Este monto es atribuible exclusivamente al efecto de los pares de tracción de los vehículos pesados sobre el daño del pavimento, al considerar únicamente un tramo carretero, en este caso, el segmento de 115 km de la caseta de Tepetzotlán.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Dentro de las medidas de desempeño reportadas en la literatura para evaluar el efecto de los vehículos sobre el pavimento, se identificaron dos vertientes de desarrollo polarizado. Por un lado, se tienen los modelos que se basan exclusivamente en las fuerzas ejercidas por los vehículos sobre el pavimento y, por consecuencia, desprecian la respuesta dinámica del pavimento. Por otro lado, los modelos que consideran la respuesta del pavimento a las cargas de los vehículos, demandan poderosos medios computacionales y, por lo tanto, resultan inviables para simular la interacción masiva de los vehículos con los pavimentos.

Sin embargo, de manera intermedia entre estas dos aproximaciones se reconoció una metodología desarrollada en México, que toma en cuenta tanto las fuerzas producto del tráfico vehicular como la respuesta del pavimento. Esta última, como una función de varias propiedades inherentes a la interacción, las cuales incluyen la velocidad de aplicación de la carga y la temperatura del pavimento. A su vez, permite realizar simulaciones de tráfico realistas masivos al circular por longitudes reales de pavimento, para lo cual requiere plataformas de cómputo convencionales.

De esta forma, la medida de desempeño referida, utiliza modelos de vehículos compuestos de masas rígidas acopladas por elementos flexibles y amortiguadores carentes de masa. El pavimento es representado por una serie de elementos asfálticos desacoplados y soportados por un medio continuo rígido. El parámetro de desempeño, asociado al daño potencial del pavimento, es identificado en la energía de deformación que transitoriamente se almacena en los elementos asfálticos producto del paso de los vehículos.

No obstante, esta medida de desempeño, conocida como enfoque energético, tiene la limitación de considerar únicamente las fuerzas verticales que los vehículos ejercen sobre el pavimento. Al respecto, en el desarrollo de esta tesis se partió de esta medida de desempeño del pavimento, validada y previamente reportada en la literatura, para desarrollar un Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos por Vehículos Pesados. Esta nueva medida de desempeño, se nombra integral debido a que además de considerar las fuerzas verticales que los vehículos ejercen sobre el pavimento, también toma en cuenta el efecto de las fuerzas tangenciales de tracción ejercidas en la interfaz llanta-pavimento, como una función de la resistencia a la rodadura y del arrastre de aire.

En esta sección, se presenta el resumen de las principales conclusiones obtenidas producto del desarrollo de esta tesis. Posteriormente, se describen las contribuciones más importantes así como las limitantes del trabajo presentado. Por último, se mencionan las recomendaciones sobre trabajos futuros dentro de esta línea de investigación.

5.1 Análisis del efecto de la interacción vehículo pesado – pavimento

La formulación asociada al efecto de los pares de tracción (desarrollada y presentada en el Capítulo 3 de esta tesis), se incorporó al esquema computacional correspondiente al del enfoque energético. Posteriormente se realizaron diversos análisis, los cuales consistieron de: (i) análisis paramétrico; (ii) estudios de caso; (iii) costo por energía de deformación; y (iv) efecto de los pares de tracción. A continuación, los siguientes puntos describen las principales conclusiones obtenidas producto de estos cuatro análisis.

5.1.1 Análisis paramétrico

La formulación descrita en el punto anterior se aplicó en el desarrollo de un análisis paramétrico, con el objeto de evaluar diversas situaciones asociadas a la interacción vehículo pesado-pavimento. Las tendencias obtenidas en cuanto al nivel de carga y la velocidad del vehículo sobre el grado de afectación en el pavimento, fueron las esperadas y coincidieron de forma general con lo reportado. Sin embargo, el efecto de la rugosidad del pavimento exhibió tendencias discutibles, las cuales son derivadas del concepto

energético en sí, ya que este representa una relación cuadrática respecto a las fuerzas ejercidas por los vehículos sobre el pavimento. De esta forma, para algunos vehículos (C3) un incremento en la rugosidad representó un aumento en el daño potencial de los pavimentos, mientras que para los demás (C2, T3-S2 y T3-S3), las tendencias fueron en sentido inverso. Esta misma situación podría ocurrir con otros enfoques, tal como la “Ley de la Cuarta Potencia”. Esto debido a que también considera una tendencia no lineal entre el daño potencial del pavimento y el nivel de carga, por lo cual una mayor dispersión en las cargas, asociada a una rugosidad más elevada, implicaría un daño menor del pavimento. Por lo tanto, se concluye que es necesario revisar con mayor detalle el contenido espectral de los perfiles empleados, en relación a los modos de vibración de las diferentes masas de los vehículos simulados.

5.1.2 Estudios de caso

La medida de desempeño propuesta, consistió de un Coeficiente Integral de Daño a Pavimentos por Vehículos Pesados. Este coeficiente se definió en términos de una cierta longitud que los vehículos simulados tuvieron que recorrer (136 metros), bajo condiciones dadas de rugosidad del pavimento y características convencionales de los vehículos, en cuanto al tipo de suspensiones y llantas empleados, así como una distribución nominal de la carga entre sus diferentes ejes y una velocidad de circulación definida. En términos generales, se estableció el cálculo de la energía que estaría asociada al daño causado en el pavimento por el tráfico de vehículos pesados.

A este respecto, los cálculos de la energía de deformación, como una función de las condiciones de operación de los vehículos y de las propiedades de los pavimentos, se efectuaron a manera de estudios de caso. Para ello se emplearon dos flujos medidos, uno en Francia y otro en México. Las simulaciones dieron como resultado que la cantidad de energía por Ton de Peso Bruto Vehicular (PBV), es hasta 4 veces mayor para el caso mexicano, al considerar el único vehículo en común entre ambos tráficos medidos, esto es, el vehículo tipo C2. Mientras que este vehículo en Francia implicó alrededor de 2 kJ por cada Ton de PBV, en México esta cifra fue de 7 kJ/Ton. Esto se atribuye a diferentes factores, pero primordialmente al nivel de carga promedio de los vehículos, que es 20% menor en el caso francés, así como a la temperatura media del pavimento, que también fue menor en Francia. De esta forma, todos estos factores indican una situación menos favorable en cuanto al uso de la infraestructura por parte del vehículo C2 en México, con respecto a este mismo tipo de vehículo pero al circular en Francia.

5.1.3 Costo por energía de deformación

Se tomaron los costos anuales de mantenimiento de las infraestructuras carreteras en México y se realizó una asociación de tales montos con la energía de deformación estimada en un flujo vehicular medido. Con base en estos valores se calculó el costo promedio específico por cada 100 km de recorrido, atribuible al daño sobre el pavimento producto de los diferentes tipos de vehículos dentro del tráfico medido. Estos valores resultaron altamente dispersos, donde las relaciones entre los valores máximos y mínimos fueron una función del tipo de vehículo. De esta manera, tales cocientes fueron de 4.2, 5.5, 3.2 y 3 para los vehículos C2, C3, T3S2, y T3S3, respectivamente.

Posteriormente, se tomaron estos costos promedio específicos asociados al flujo de vehículos pesados y se ajustaron para un recorrido de 115 km, para posteriormente compararlos con la tarifa de peaje en la caseta de Tepetzotlán, sobre la carretera México-Querétaro. Esta comparación reveló que se cobrarían montos inferiores a lo que se invierte en conservación y mantenimiento. En el caso del vehículo T3-S2, se cobraría alrededor de la mitad del costo provocado por concepto del daño del pavimento.

5.1.4 Efecto de los pares de tracción

Para estimar el efecto de los pares de tracción, se estimó el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) correspondiente a la carretera de cuota de la caseta de Tepetzotlán. Posteriormente, se estimaron los porcentajes de los cuatro tipos de vehículos pesados (C2, C3, T3-S2 y T3-S3) dentro del TDPA. Se consideraron como representativos los costos promedio específicos estimados para el tráfico medido y atribuibles al daño del pavimento por el paso de los vehículos. A estos montos se les aplicaron los porcentajes producto del efecto de los ejes tractivos. Al respecto, tales porcentajes por tipo de vehículo corresponden a: C2 con 1.57%; C3 con 1.55%; T3-S2 con 0.88%; y T3-S3 con 1.64%. Posteriormente, se calculó el monto por día y por año.

El monto total anual, correspondiente al daño del pavimento en el tramo en estudio de 115 km y asociado al efecto exclusivo de los pares de tracción, se estimó arriba de 28 millones de pesos. Esto nos indica que unos pocos puntos porcentuales atribuibles al daño del pavimento por un solo vehículo, en el contexto de los tráficos vehiculares masivos, así como las miles de Ton movidas y aunadas a los miles de millones de

pesos invertidos en mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura carretera, pueden representar montos económicos importantes en periodos de tiempo relativamente cortos. Por lo tanto, bajo este contexto, se concluye como justificable el desarrollo que involucra la consideración del efecto de los pares de tracción sobre el daño potencial del pavimento.

5.2 Contribuciones y limitantes

La principal contribución de esta tesis se identifica en la asignación de una cantidad monetaria a una cantidad física. Esta cantidad física, la energía de deformación del pavimento, resulta novedosa en el contexto de la evaluación del efecto potencial de los vehículos sobre el pavimento. Sin embargo, aunque existía una medida de desempeño reportada en la literatura que utiliza dicha magnitud, ésta ha sido actualizada y ampliada, en el sentido de que se le han incorporado efectos que representan variantes en el daño de los pavimentos. Si bien, tales efectos están en el orden de unos pocos puntos porcentuales, en el rango de 3%, su relevancia se manifestó al verse en la perspectiva de los millones de pesos que son invertidos anualmente en el mantenimiento y conservación, al considerar incluso un solo tramo carretero de 115 km de longitud.

Por otro lado, la principal limitante radica en el análisis del efecto de la rugosidad del pavimento, cuyo desarrollo deberá afinarse en trabajos posteriores, como se indica en el siguiente apartado.

5.3 Recomendaciones sobre trabajos futuros

La principal actividad que debería desarrollarse como continuación de los trabajos aquí reportados, consiste en la caracterización del daño de los pavimentos como una función de la rugosidad de los mismos.

Estudios específicos, tendientes a caracterizar el efecto de los pares de tracción sobre el daño de los pavimentos, podrían enfocarse a determinar el efecto de las fuerzas tangenciales ejercidas en la interfaz

llanta-pavimento en estado transitorio, es decir, en el que la velocidad del vehículo varía. Adicionalmente, se podría cuantificar este efecto al incluir cambios en la pendiente del pavimento y considerar intersecciones en los caminos, en las cuales los vehículos pesados tienen que frenar-acelerar constantemente. La justificación de estos estudios radica en que los valores de la energía almacenada en el pavimento, atribuibles a los pares de tracción, podrían incrementar de forma importante debido a la consideración de situaciones extremas de uso de caminos por parte de los vehículos pesados. Esto con respecto a los montos de energía obtenidos producto del empleo exclusivo de pavimentos horizontales, donde los vehículos se desplazan en estado permanente (velocidad constante), tal y como se consideró en el desarrollo de la formulación presentada en el Capítulo 3 de esta tesis.

Por otra parte, dadas las deficiencias presentes en la normatividad nacional, expuestas en el Capítulo 2, se recomienda implementar la medida de desempeño desarrollada en esta tesis como Norma Nacional. Esto con el fin de evaluar de manera objetiva el impacto que tendría el empleo de ciertos componentes de los vehículos, tales como las propiedades de rigidez y amortiguamiento de las suspensiones y llantas, así como cambios en la reglamentación asociados al peso y dimensiones con que se permite transitar a los vehículos pesados. De igual manera, permitiría establecer el efecto de considerar variaciones en las condiciones de operación de los vehículos, en particular, la relacionada a la velocidad de circulación.

Adicionalmente, investigaciones posteriores podrían enfocarse a cuantificar el efecto del movimiento de la carga transportada sobre el daño de los pavimentos, a través de la consideración del mismo parámetro de desempeño utilizado en esta tesis, esto es, la energía de deformación. Como se describió en el Capítulo 2, la oscilación de las cargas líquidas denota variaciones importantes en las fuerzas que las llantas de los vehículos pesados ejercen sobre el pavimento. Así, estas fuerzas podrían ser asociadas a los montos de energía de deformación almacenada en ambos costados del pavimento y, por lo tanto, al daño potencial del mismo. Más aún, este efecto podría ser incorporado dentro del modelo desarrollado en esta tesis, para de esta forma ampliar el espectro de aplicaciones del enfoque resultante.

Por último, en la mira de desarrollar un enfoque que permita modelar el efecto del tráfico masivo de vehículos pesados sobre la infraestructura de transporte, líneas de investigación futura podrían utilizar el enfoque de la energía de deformación para evaluar el desempeño de los puentes, así como explicar el mecanismo de falla del pavimento a través de este parámetro de desempeño.

Bibliografía

- Aguerreberre, R. y F. Cepeda. 1991. Estado superficial y costos de operación en carreteras. Publicación Técnica No. 30, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1991.
- Al-Qadi, I.L., C.E. Via, M. Elseifi, and P.J. Yoo. 2004. Pavement damage due to different tires and vehicle configurations. The roadway infrastructure group Virginia Tech Transportation Institute.
- Amoo-Dodoo, N., and N. Thorpe. 2005. A new approach for allocating pavement damage between heavy goods vehicles for road-user charging. *Transport Policy*, Volume 12, Issue 5, September 2005, Pages 419-430.
- Ankner, W. 2002. Testimony to the U.S. Senate Committee on Environment and Public Works. September, 2002.
- Archilla, A.R., and S. Madanat. 2000. Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data. *Journal of Transportation Engineering*, 126(4), 291-299.
- Arriaga, M. y P. Garnica. 1998. Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos. Publicación Técnica No. 111, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 1998.
- Billing, J.R., and J.D. Patten. 2005. An Assessment of Tank Truck Roll Stability". Technical Report CSTT-HVC-TR-059, Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council of Canada, 1 March 2005, 50 pp. 12.
- Boilé, M., P. Narayanan, and K. Ozbay. 2003. Impact of buses on highway infrastructure. Case study of New Jersey State. *Transportation Research Record* 1811, Paper No. 03-4223, 32-40.
- CAPUFE. 2008. Tarifas vigentes en autopistas, caminos directos y puentes. <http://www.capufe.gob.mx:81/statics/WebCAPUFE/ParaTuViaje/Statics/Tarifas/TarifasRP2008.htm>
- CARE. 2004. 2004 Alabama Traffic Crash Facts. CARE Research & Development Laboratory, pp. 35.
- Carpenter, S. 1992. Load equivalency factors and rutting rates: The AASHO road test. *Transportation Research Record (TRB)*, NRC.
- CDCII. 2002. Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles. Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (CDCII). Colección de documentos Vol. No. 11, 2002.
- Cebon, D. 1999. Handbook of vehicle-road interaction. Swetz and Zeitlinger, PA, 1999.
- Cebon, D. 1993. Interaction between heavy vehicles and roads. SAE paper SP-951.

- Chatti, K., H.B. Kim, K.Y. Kyong, J.P. Mahoney, and C.L. Monismith. 1996. Field Investigation into Effects of Vehicle Speed and Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement Strains". Transportation Research Board, Research Record No. 1539, 66–71.
- Chu, C.P., and J.F. Tsai. 2004. Road pricing models with maintenance cost. Kluwer Academic Publishers. Transportation 31, pp. 457.
- Cole, D.J., and D. Cebon. 1994. Truck suspension design to minimize road damage. Technical Report, CUED/C-MECH/TR64, Cambridge University Engineering Department, 1994.
- Cole, D.J., A.C. Collop, T.E.C. Potter, and D. Cebon. 1996. Spatial repeatability of measured dynamic tire forces". In IMechE J. Auto. Eng. Vol. 210 (D3), 1996, pp. 185.
- Collop, A.C., D. Cebon, and D.J. Cole. 1996. Modeling the effects of spatial repeatability on pavement life. Artículo presentado en la conferencia Vehicle-Infrastructure Interaction IV. San Diego, Junio 1996.
- Collop, A.C., and D. Cebon. 1995. Parametric study of factors affecting flexible pavement performance. Journal of Transportation Engineering, 121(6), 485-494.
- Collop, A.C., and D. Cebon. 1993. A model of whole-life flexible pavement performance. Cambridge University Engineering Department.
- Collop, A.C. 1993. Effects of traffic and temperature on flexible pavement wear. Ph.D. Thesis. Cambridge University.
- Davis, G.A., J. Pei, and P. Morris. 2005. Identification of causal factors and potential countermeasures for fatal rural crashes. Reporte de accidentes del Estado de Minnesota, EUA, MN/RC-2005-42, Octubre 2005.
- De Solminihaç, H. 2001. Gestión de infraestructura vial. Editorial Universidad Católica de Chile.
- DGST. 2008. Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos. Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Cap. II, 2008.
- Dieter. 1986. Engineering Design. MCGraw Hill.
- DOT. 2006. Long-term pavement performance. Reference Library CD. www.fhwa.dot.gov/pavements/ltp (December, 2006).
- DOT. 2004. National Cooperative Highway Research Program, 2002 Design Guide: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Draft Final Report. NCHRP Study 1-37A, Washington DC, July 2004.

- Fekpe, E.S.K. 2006. Pavement damage from transit buses and motor coaches. En Proc. 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. The Pennsylvania State University. June, 2006.
- Fekpe, E.S.K. 1999. Cost allocation implications of dynamic wheel loading. In Heavy Vehicle Systems, A series of the International Journal of Vehicle Design, 6(1-4), pp. 162.
- Foster, G., N. Mabbott, and B. McPhee. 2001. Heavy vehicle seat vibration and driver fatigue. Report No: CR 203, Australian Transport Safety Board.
- Fu, T.-T., and D. Cebon. 2002. Analysis of a truck suspension database. Heavy Vehicle Systems, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 9, No. 4, pp 281- 297.
- Garnica, P. y A. Correa. 2004. Conceptos mecanicistas en pavimentos flexibles. Publicación Técnica No. 258, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 2004.
- Gillespie, T.D., S.M. Karamihas, D. Cebon, M.W. Sayers, M.A. Nasim, W. Hasen, and N. Ehsan. 1993. Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance. NCHRP Report 353, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1993.
- González, J.M., J.M. Caneta, S. Ollera, and B. Miró. 2007. A viscoplastic constitutive model with strain rate variables for asphalt mixtures-numerical simulation. Computational Materials Science, 38(4), 543-560.
- GR. 2008. Buscan conservar tramos carreteros. Reforma/Negocios/Karla Ramírez. 8 de Febrero de 2008.
- Gutiérrez, J.L., A. Mendoza y P. Dontchev. 1999. Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional – Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 1995 y 1996. Documento Técnico No. 20, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1999.
- Gutiérrez, J.L., N. Villegas y V.J. Soria. 2006. Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional – Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas 2005. Documento Técnico No. 37, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2006.
- Gyenes, L., and C.G.B. Mitchell. 1994. The spatial repeatability of dynamic pavement loads caused by heavy goods vehicles. En Heavy Vehicle Systems. Special Series of International Journal of Vehicle Design. Vol. 1, No. 2, 1994, pp. 156.
- Haas, R., W.R. Hudson, and J. Zaniewski. 1993. Modern pavement management. R.E. Krieger Publishing Company, Florida, 1993.
- Harrall, C.G., and A. Faiz. 1988. Road deterioration in developing countries – causes and remedies. World Bank Policy Study.

- Harwood, D.W., I.B. Potts, D.J. Torbic, and W.D. Glauz. 2003. Synthesis 3: Highway/Heavy Vehicle Interaction. Commercial truck and bus safety synthesis program, Federal Motor Carrier Safety Administration, Transportation Research Board, 2003, 94 pp.
- Hassan, R.A., and K. McManus. 2003. Assessment of Interaction Between Road Roughness and Heavy Vehicles. Transportation Research Record 1819, paper No. LVR8-1076, 236-243.
- Hildebrand, G. 2003. Modeling of Pavement Response From a Field Test. Proc. TRB 2003 Annual Meeting, Washington, D.C. January 2003.
- Holquín-Veras, J. 2008. Necessary conditions for off-hour deliveries and the effectiveness of urban freight road pricing and alternative financial policies in competitive markets. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 42, Issue 2, February 2008, Pages 392-413.
- Hong, F., and J.A. Prozzi. 2006. Estimation of Pavement Performance Deterioration Using Bayesian Approach. J. Infrastruct. Syst. 12, 77.
- Hsu, K.M., D.A. Streit, and B.T. Kulakowski. 1995. Analytical and experimental comparison of heavy vehicle loads on pavements. Transportation Research Record 1473. TRB. NRC. Pp 101-107.
- Huang, Y.H. 2004. Pavement analysis and design. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 2004.
- Hudson, W.R., C.L. Monismith, J.F. Shook, F.N. Finn, and E.L. Skok. 2007. AASHO road test effect on pavement design and evaluation after 50 years. Transportation Research Circular No. E-C118. Transportation Research Board, of the National Academies. July, 2007, pp. 17.
- Hussain, S., and N.A. Parker. 2006. Pavement damage and road pricing. Transportation Research Board (TRB). 86th Annual Meeting. Paper #06-1342. Washington, D.C., January 2006.
- Ibrahim, I.M. 2004. Design aspects of reducing the generated dynamic tyre loads of the articulated tanker vehicles. International Journal of Heavy Vehicle Systems, Volume 11, Number 1 / 2004, pp. 86 - 99.
- IMT. 2007. Manual estadístico del sector transporte 2007. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- IMT. 1991. Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas. Publicación Técnica No. 21, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 1991.
- 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. En Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor. 1995, pp. 273.
- Juvinall, R.C. 1996. Fundamentos de diseño para ingeniería mecánica. LIMUSA.
- Kang, X., S. Rakheja, and I. Stiharu. 2000. Directional Dynamics of a Partly-Filled Tank Vehicle.

- Karamihas, S.M. and T.D. Gillespie. 1994. Trucks and pavement wear: findings from new research. UMTRI Research Review. May-June 1994. 24(6).
- Kenis, W.J., N. Mrad, and M. El-Gindy. 1998. Spatial repeatability of dynamic wheel loads for heavy vehicles: a literature review. In Heavy Vehicle Systems. Special Series of International Journal of Vehicle Design. Volume 5, No. 2, 1998, pp. 116.
- Kim, Y.R., T.Y. Yun, and M. Guddati. 2005. Modeling of the behavior of hot mix asphalt in compression. Transportation Research Board (TRB). Annual Meeting. Paper # 06-2993. Washington, D.C. July, 2006.
- Kistler. 2007. Weigh in motion. <http://www.kistler.com>.
- Kitching, K.J., D.J. Cole, and D. Cebon. 1998. Use of controllable suspensions to minimize road damage. Submitted to IMechE J. Auto. Eng. June, 1998.
- Lay, M. 2008. A history of freight transport prior to the modern truck. Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles, Paris, Mayo 2008.
- LeBlanc, P.A., and J.H.F. Woodrooffe. 1995. Spatial correlation of dynamic wheel loads. Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI. Ann Arbor. 1995, pp 281.
- Lin, W-K, Y-C. Chen, B.T. Kulakowski, and D.A. Streit. 1994. Dynamic wheel/pavement force sensitivity to variations in heavy vehicle parameters, speed and road roughness. Heavy Vehicles Systems. Special Series. Int. J. of Vehicle Design, 1(2) 139-155.
- Liu, Ch. 1999. Surface Roughness Effect on Dynamic Response of Pavements. Journal of Transportation Engineering, 125(4), 332-337.
- Long, F.M., and H.L. Theyse. 2004. Mechanistic-Empirical Structural Design Models for Emulsified Bitumen Treated Materials. Report No: CR-2003/44, SABITA, Gautrans.
- Lukanen, E.O., R.N. Stubstad, and M.L. Clevenson. 2005. Study of LTPP pavement temperatures. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-RD-02-071. March, 2005.
- Luo, Z. 2005. Flexible pavement condition model using clusterwise regression and mechanistic-empirical procedure for fatigue cracking modeling. Ph.D. Dissertation. The University of Toledo.
- Luskin, D.M., and C.M. Walton. 2001. Effects of truck size and weights on highway infrastructure and operations: A synthesis report. Report No. FHWA/TX-0-2122-1, Center for Transportation Research, 82 pp.

- Martin, P.T., Y. Feng, and X. Wang. 2003. Detector technology evaluation. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Utah Traffic Lab. November, 2003.
- Mendoza, A., A. Cadena, O. De Buen, L. Domínguez y A. Rico. 1992. Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos de carga que circulan por las carreteras mexicanas. Documento Técnico No. 8, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 1992.
- Mendoza, A. y J.L. Gutiérrez. 1994. Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras nacionales. Impactos económicos de la reglamentación y el control de pesos de 1993. Publicación Técnica No. 52, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 1994.
- Modaressi-Tehrani, K., S. Rakheja, and Sedaghati. 2006. Analysis of the overturning moment caused by transient liquid slosh inside a partly filled moving tank. *J. Automobile Engineering, Proc. IMechE*, 220, pp.289-301.
- Molenaar, A.A.A. 2007. Design of flexible pavements. Lecture Notes CT 4860. Faculty of Civil Engineering, Delf University of Technology. March, 2007.
- Moran, T., M. Sullivan, J. Mahoney, and K. Chatti. 1995. A demonstration of the theory of spatial repeatability. En *Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*. UMTRI. Ann Arbor. 1995, pp. 291.
- Moreno, E. 2004. El sobrepeso en el autotransporte de carga: Elementos para su estudio y control. Publicación Técnica No. 250, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 2004.
- Newbery, D. 1988. Road user charges in Britain. *The Economic Journal*. 1988, pp. 161.
- NTC. 2005. Rules for Assessment of Potential PBS Vehicles – Discussion Paper and draft Rules. Reporte por Pearsons Transport Resource Centre Pty Ltd, Mechanical System Dynamics Pty Ltd and ARRB Group Ltd. National Transport Commission, Melbourne, Australia.
- OCDE. 1998. Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE). Technical report DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL. Paris, OECD, 1998.
- Ongel, A., and J. Harvey. 2004. Analysis of 30 years of pavement temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM). California Department of Transportation. Pavement Research Center Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley University of California, Davis. August, 2004.
- Papagiannakis, A.T., M. Bracher, J. Li, and N. Jackson. 2006. Optimization of traffic data collection for specific pavement design applications. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-HRT-05-079. May, 2005.

- Pape, D. B., K. Harback, N. McMillan, A. Greenberg, H. Mayfield, J.C. Chitwood, M. Barnes, C.B. Winkler, D. Blower, T. Gordon, and J. Brock. 2007. Cargo tank Roll Stability Study. Final report, Contract No. GS23-F-0011L, Batelle, April 30, 2007.
- PIARC. 1987. Report of the Committee on Surface Characteristics. Proceedings of the XVIII World Road Congress. World Road Association (PIARC). Paris, France, 1987.
- Popov, E.P. 1976. Mechanics of Materials. Second Edition, Prentice Hall, pp. 590.
- Potter, T.E.C., D. Cebon, A.C. Collop, and D.J. Cole. 1994. Road-damaging potential of measured dynamic tyre forces in mixed traffic. Submitted to ImechEJ. Auto. Eng. November, 1994.
- Quijada-García, J.H. 2005. El perfil del pavimento y el desempeño global dinámico de vehículos articulados. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, 2005.
- Rakha, H., I. Lucic, S. Demarchi, M. Van Aerde, and J. Setti. 2001. Vehicle Kinematics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. January, 2001.
- Rico, A. y H. Del Castillo. 1989. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Vol 2, Limusa. México.
- Rico, A., A. Mendoza y C. Rivera. 1995. Criterios para establecer la cuota óptima en una autopista de cuota. Publicación Técnica No. 60, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1995.
- Rico, A., A. Mendoza, R. Téllez y E. Mayoral. 1998B. Algunos aspectos comparativos entre pavimento flexibles y rígidos. Publicación Técnica No. 103, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1998.
- Rico, A., J.M. Orozco, R. Téllez y M. Sánchez. 1988. Análisis de los coeficientes de daño unitarios correspondientes a los vehículos autorizados en la red nacional de carreteras mexicanas. Publicación Técnica No. 5, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1988.
- Rico, A., R. Téllez y P. Garnica. 1998A. Pavimentos flexibles: Problemática, metodologías de diseño y tendencias. Publicación Técnica No. 104, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1998.
- Rolland, R., B. Pearson, and J. Edgar. 2006. Performance-based standards – recent developments in Australia., Memorias. Proc. 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, The Pennsylvania State University.
- Romero, J.A., E. Betanzo, and A. Lozano. 2006. Conceptual design of an intelligent toll station”. Int. J. of Heavy Vehicle Systems, Vol. 13, Nos. 1/2, pp 98-106.

- Romero, J.A., A. Lozano, and E. Betanzo. 2009. A pavement response-based metrics to assess flexible pavement damaging potential of heavy vehicles. En revision, Journal of Automobile Engineering, IMECHE. Enero, 2009.
- Romero, J.A., A. Lozano, and W. Ortiz. 2007. Modelling of liquid cargo – vehicle interaction during turning manoeuvres. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June18-21, 2007.
- Romero, J.A., and A. Lozano. 2008. A hydrostatic sensor for portable WIM systems. 5th Conference on Weigh in Motion, Paris Marne-la-Vallée, Mayo 19-22. John Wiley and Sons, ISBN 978-1-84821-059-2.
- Romero, J.A., and A. Lozano. 2006. Effect of trucks suspension and tire properties on pavement damage spatial distribution. The Transportation Research Record (TRR), Journal of the Transportation Research Board No. 1949, ISBN 0309099587, pp 148-154.
- Romero, J.A., and A. Lozano. 2000A. A simulation methodology for analysis of vehicles – pavement interactions in a real traffic environment. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 5-10, 2000. Orlando, Florida.
- Romero, J.A., and A. Lozano. 2000B. Study of Road damage potentials of mixed traffic. International Forum for Road Transport Technology, 6th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, June 18-22, 2000. Saskatoon, Saskatchewan, Canada, pp 229-238.
- Romero, J.A., and A. Lozano. 1995. Modelado matemático de la interacción dinámica vehículo pesado - pavimento. Reporte Interno. Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Pp 78.
- Romero, J.A. 2000. Consideración de la energía de deformación en el análisis del daño de pavimentos causado por vehículos pesados. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- Romero, J.A. 1996. La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el índice internacional de rugosidad. Publicación Técnica No. 67, Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 1996.
- Santos, G., and L. Rojey. 2003. Distributional impacts of road pricing: the truth behind the myth. Transportation Research Board (TRB). Annual Meeting. Paper # 03-3211. Washington, D.C. November, 2002.
- Sayers, M.W., T.D. Gillespie, and D.O. Paterson. 1986. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements. University of Michigan, Transport Research Institute (UMTRI).
- Sayers, M.W., and S. Karamihas. 1998. The little book of profiling. The Regent of the University of Michigan. September, 1998.

- Sayers, M.W. 1995. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. Transportation Research Board (TRB). Annual Meeting, INCONNU (1995), no 1501. Washington, D.C.
- SCT. 2008. Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. Norma Oficial Mexicana, NOM-012-SCT-2-2008. Dirección General de Autotransporte Federal, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Marzo 2008.
- Shames, I.H. 1967. La Mecánica de los Fluidos. Mc-Graw Hill Book Co., 583.
- Small, K.A., C. Winston, and C.A. Evans. 1989. Road work: A new highway pricing and investment policy. Brookings Institution Press.
- Straus, S.H., and J. Semmens. 2006. Estimating the cost of overweight vehicle travel on Arizona highways. Transportation Research Board (TRB). Annual Meeting. Paper # 06-0959. Washington, D.C. January, 2006.
- Sweatman, P.F. 1983. A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles. Australian Road Research Board Special Report 27. 65 pp.
- Tan, W.H.L., and R. Subramaniam. 2006. Congestion control of heavy vehicles using electronic road pricing: the Singapore experience. Int. J. of Heavy Vehicle Systems 2006 - Vol. 13, No.1/2 pp. 37 – 55
- Tellis, R., and C.J. Khisty. 1997. Social cost component of an efficient toll. Transportation Research Board (TRB). Record 1576, pp. 140.
- Thompson, M.R., and D. Nauman. 1993. Rutting rate analyses of the AASHO road test flexible pavement. Transportation Research Record (TRR), National Academy Press, NRC.
- TRIP. 2006. The interstate highway system: Saving lives, time and money. The Road Information Program (TRIP). Washington, D.C. June, 2006.
- US-DOT. 2004. Status of the nation's highways, bridges and transit: Conditions & performance. U.S. Department of Transportation (US-DOT). Report to Congress: Executive Summary.
- Wachs, M. 2003. Improving Efficiency and Equity in Transportation Finance. Center on Urban and Metropolitan Policy, April 2003.
- Wang, T.L., M. Shahawy, and D.Z. Huang. 1992. Dynamic response of highway trucks due to roads surface roughness. Computers and Structures. Vol. 49. No. 6. Pp 1055-1067.

- Wasfy, T.M., J. O'Kins, and S. Smith. 2008. Experimental Validation of a Coupled Fluid-Multibody Dynamics Model for Tanker Trucks. SAE paper 2008-01-0777.
- Wideberg, J. 2007. Planta de potencia y transmisión. Grupo de ingeniería e infraestructura de transportes, ESI Sevilla.
- Woodrooffe, J.H.F., P.A. LeBlanc, and A.T. Papagiannakis. 1988. Suspension dynamics, experimental findings and regulatory implications. SAE paper 881847.