

# Influencia de las características de diseño de vehículos pesados en el deterioro por fatiga de pavimentos.

## Parte I: Influencia en las cargas

PUBLICO PINTADO SANJUÁN (\*)

JAVIER GUTIÉRREZ RUMBAO (\*\*)

**RESUMEN** Los pavimentos de carreteras se deterioran rápidamente cuando están sometidos a las cargas dinámicas generadas por el tráfico de vehículos pesados. No todos los vehículos con igual peso por eje dañan el pavimento por igual. La cuantificación de la influencia de los distintos parámetros de la suspensión y los neumáticos en el daño es un problema poco tratado. En este artículo se presenta un estudio numérico de la influencia de una serie de características del vehículo en el daño infligido a la estructura de la carretera. En esta primera parte se analiza la influencia sobre las cargas dinámicas, mientras que en una segunda parte se realiza una estimación de la influencia en la vida a fatiga utilizando un modelo "Winkler" de pavimento.

### INFLUENCE OF HEAVY VEHICLE CHARACTERISTICS ON PAVEMENT FATIGUE DAMAGE. PART I: INFLUENCE ON LOADS

**ABSTRACT** Road pavements are rapidly deteriorated when subjected to the dynamic loading generated by heavy vehicle traffic. Not all vehicles with equal static axle loads are equally damaging to the pavement. The quantitative influence of a series of suspension and tire parameters on pavement damage has not been sufficiently studied. A numerical study on the influence of several vehicular parameters on the damage exerted to road pavements is presented in this paper. In Part I, the influence of these parameters on the dynamic loading is addressed, while in Part II, the fatigue life, based on a Winkler foundation model for the pavement, is estimated.

**Palabras clave:** Pavimento; Fatiga; Deterioro; Vehículo pesado; Carga por eje; Suspensión; Modelo de simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los gobiernos de países desarrollados y en vías de desarrollo dedican una fracción nada despreciable de sus presupuestos a la construcción y ampliación de la red de carreteras. La duración o vida útil de esta costosa infraestructura no es infinita. Las carreteras se deterioran debido a la aplicación repetida de cargas que supone el tráfico de vehículos pesados. La cuantificación de la vida a fatiga de las distintas estructuras utilizadas en la construcción de estas vías es un problema complejo de una extraordinaria trascendencia económica. Tradicionalmente se ha utilizado una ley empírica que relaciona el "daño" en la carretera con la potencia cuarta de la carga estática que cada semieje ejerce sobre el pavimento (6). Hoy se sabe que esta ley es impre-

cisa y que puede llevar a estimaciones de la vida a fatiga con errores equivalentes a varios órdenes de magnitud. Las fuentes de error son variadas. La más evidente es que la carga sobre el terreno no es constante, varía con el tiempo y su variación depende del perfil de la carretera y de la dinámica de la suspensión del vehículo.

El perfil de la carretera excita el movimiento vertical del vehículo que, a su vez, responde generando cargas de variación dinámica sobre el pavimento. La variación de estas cargas depende de las características del vehículo y su correspondiente suspensión. En términos generales se puede afirmar que suspensiones "blandas" como las de aire son menos severas (en cuanto a amplificación dinámica de las cargas se refiere) que suspensiones más rígidas como las de ballestas metálicas. La predicción de la vida a fatiga de pavimentos en función de sus propiedades estructurales y de las características de diseño de la flota de vehículos es un problema multidisciplinar. No es posible obviar los aspectos de dinámica de vehículos ni los relacionados con el comportamiento mecánico de la infraestructura. En junio de 1986,

(\*) Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Ingeniería Mecánica. ESI, Universidad de Sevilla.

(\*\*) Ingeniero Industrial, Estudiante postgraduado. ESI, Universidad de Sevilla.



el "International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions", en Canadá, acercó por primera vez a investigadores relacionados con los aspectos de Ingeniería Civil y Mecánica del problema en cuestión.

La fatiga está controlada, casi exclusivamente, por el peso de vehículos industriales. Un turismo, por ejemplo, es del orden de 10.000 veces menos dañino que un vehículo pesado. Las implicaciones económicas derivadas de un mejor entendimiento de todos los aspectos involucrados en el problema del deterioro de carreteras ha provocado una multiplicación de los esfuerzos de investigación sobre estos temas en los últimos años. El aumento de carga por eje permite a los transportistas abaratar costes; sin embargo, puede contribuir muy negativamente al coste de mantenimiento de la red si, como contrapartida, no se favorece el uso de suspensiones poco dañinas. El coste del mantenimiento de la red de autopistas en Estados Unidos durante los próximos 20 años es de 1.6 billones de dólares (1). Esto les ha forzado a estudiar posibles medidas correctoras como la prohibición del uso de neumáticos simples de mayor ancho (*super singles*).

Al margen de la mejora del confort para el conductor y la protección de algunas mercancías frágiles, el empresario transportista no suele estar interesado en mejorar la suspensión desde el punto de vista del daño sobre el pavimento. En general elige suspensiones duraderas con bajo coste de mantenimiento. Esta es la razón por la que las suspensiones de ballestas de acero siguen teniendo gran aceptación. Estos sistemas se diseñan para proporcionar un cierto grado de elasticidad, fijar los ejes, proporcionar suficiente reacción para los esfuerzos de frenado, suficiente rigidez al vuelco, y una vida útil suficientemente larga. Pero no han sido perfeccionados para evitar las sobrecargas sobre el pavimento. Se trata entonces de generar una legislación encargada de cuidar el patrimonio vial. La Comisión Europea está considerando distintas medidas para presionar a los fabricantes de vehículos pesados a adoptar suspensiones "blandas", tales como suspensiones de aire (3). En España también se tiene en cuenta el tipo de suspensión y neumáticos a la hora de limitar la carga por eje (4). Sin embargo, aún se está lejos de entender la influencia de todos los factores involucrados en el problema.

A finales de los años 50 se realizó un importante estudio experimental, el Test de Carreteras de la AASHO, que puede considerarse el comienzo de estas investigaciones. Posteriormente se han realizado numerosos estudios, con distintas orientaciones, que continúan en la actualidad. Existen varias revisiones exhaustivas de estos trabajos. Una de ellas puede encontrarse en (10).

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1. PERFIL DE CARRETERA

Se han definido una serie de indicadores para cuantificar la calidad del perfil (irregularidad) de la carretera. De entre ellos se pueden destacar el PSR (*Present Serviceability Rating*) y el PSI (*Present Serviceability Index*) definidos en el "AASHO Road Test". Uno de los índices más recientes y más extendido es el *International Roughness Index* (IRI). El índice y el procedimiento para su determinación se describen en las referencias (2, 8). Es una medida del cociente entre el desplazamiento vertical de la suspensión y la longitud reco-

rrida. Para su determinación se utiliza un modelo matemático de cuarto de coche, sometido a la excitación definida por el perfil que se estudia.

Los parámetros del modelo utilizado para determinar el IRI corresponden, básicamente, a los de un vehículo turismo. Por tanto, el IRI caracteriza la rugosidad (irregularidad) de la carretera, principalmente, según sus efectos sobre la dinámica de los vehículos turismos. Es probable que las características de rugosidad de las carreteras que influyen en la dinámica de los turismos no sean las que determinan las cargas que los vehículos pesados ejercen sobre el pavimento. Por esto se ha propuesto un nuevo índice, el *International Truck Index* (ITI), que caracteriza la irregularidad conforme a su influencia en la dinámica de los vehículos pesados.

Se puede disponer de mucha más información sobre el perfil (irregularidad) de la carretera si se intenta describir su Función de Densidad Espectral utilizando unos pocos parámetros. Existe un gran número de funciones de ajuste. Una de las más útiles (empleada en este trabajo) es aquella que considera que la densidad espectral resulta de superponer tres fuentes independientes de ruido blanco; una de aceleraciones, otra de pendientes y otra de elevaciones o alturas (8). Las densidades espectrales de estas fuentes (constantes por ser ruido blanco) son  $G_a$ ,  $G_p$  y  $G_e$ , respectivamente. De esta forma, la densidad espectral de la carretera viene dada por:

$$S(n) = \frac{G_a}{(2\pi n)^4} + \frac{G_p}{(2\pi n)^2} + G_e$$

donde  $S$  es la densidad espectral y  $n$  el número de onda o frecuencia espacial. Aunque no existe una correlación directa, es posible estimar los valores de  $G_a$ ,  $G_p$  y  $G_e$  para algunos índices IRI.

### 2.2. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Como se ha comentado, una gran parte de las suspensiones de vehículos industriales utilizan, como elemento almacenador y disipador de energía, las ballestas de acero. Las características de fuerza frente a deflexión de estos elementos son bastante complicadas, debido, principalmente, a la presencia de la fricción. La ballesta tiene un comportamiento estático básicamente "lineal", esto es, la rigidez nominal se mantiene constante con la carga; sin embargo, el comportamiento dinámico es no lineal por el efecto disipativo de la fricción. Esto da lugar al ciclo de histéresis característico de su comportamiento dinámico. La fricción existente entre las hojas se opone a su movimiento relativo, lo que provoca un aumento en la fuerza de compresión y una disminución en la de extensión. En servicio, la ballesta está sometida a ciclos de pequeña amplitud, lo que da lugar a la aparición de una rigidez aparente que puede ser de 3 a 10 veces mayor que la nominal (9).

Fancher et al. (7) realizaron un estudio experimental sobre las propiedades mecánicas de las ballestas y propusieron un modelo para representar su comportamiento, adecuado para simulaciones de Dinámica de Vehículos. Una de las conclusiones más importantes de este estudio es que las propiedades de carga frente a deflexión de las ballestas no dependen de la frecuencia de excitación a la que están sometidas, pero sí de la amplitud y de la carga nominal.

Los ejes múltiples se diseñan para que la carga estática sea la misma en todos los ejes. La eficacia con que se lleva a cabo este equilibrado con el vehículo en movimiento depende mucho del tipo de suspensión utilizado. En general, la acu-



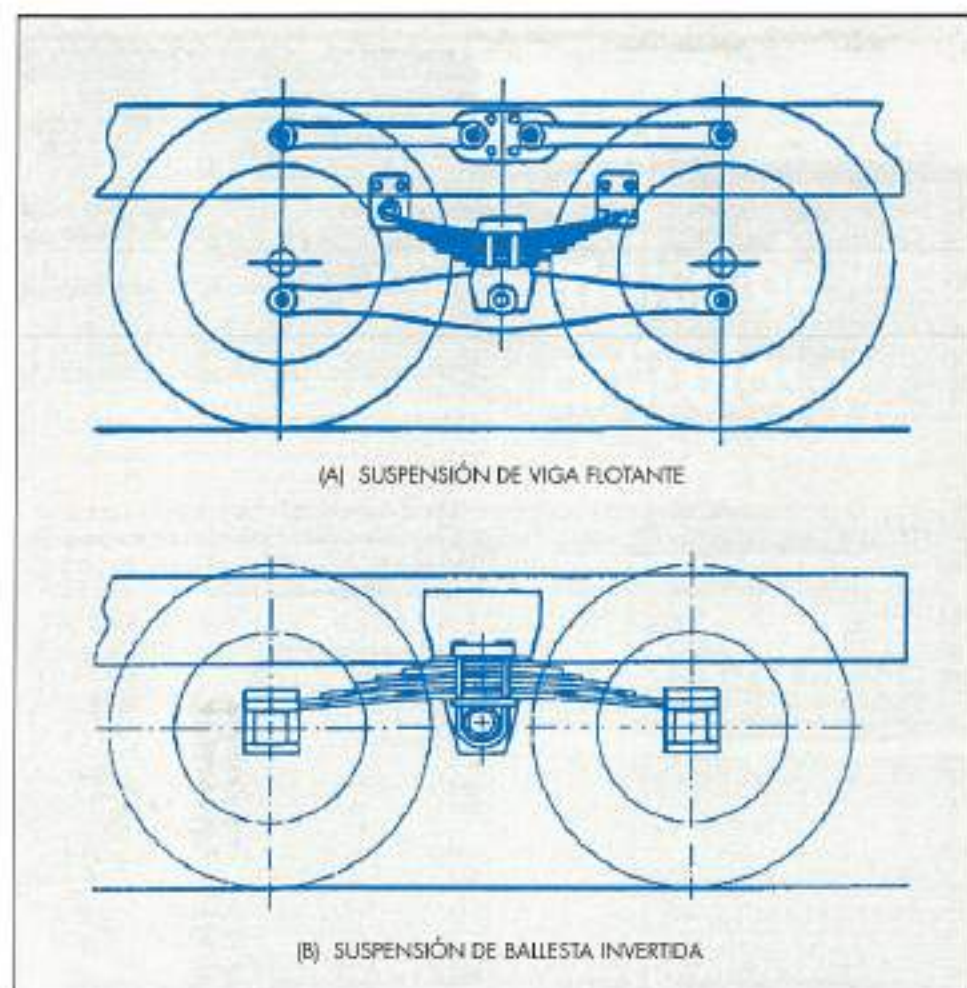


FIGURA 1. Suspensiones con centro de cabeceo.

lización estática en servicio es bastante buena en suspensiones de viga flotante, ballesta invertida y neumática. La suspensión cuatro-ballestas, sin embargo, presenta deficiencias en cuanto al equilibrio estático. Estos sistemas de suspensión se describen muy brevemente a continuación. Existen otras configuraciones para grupos de ejes, pero son poco utilizadas y no se mencionarán aquí.

#### Suspensiones con centro de cabeceo

El mecanismo para la equalización de las cargas en estas suspensiones está formado, esencialmente, por una barra que une ambos ejes y que puede pivotar alrededor de un punto medio. La configuración más usual es la suspensión *walking beam* o suspensión de viga flotante. Otro sistema muy utilizado es la suspensión dos-ballestas o de ballesta invertida. En la Figura 1 se muestran estos dos tipos de suspensión. Son suspensiones robustas y tienen una gran capacidad de articulación. Por esto suelen utilizarse en aplicaciones en las que se encuentran condiciones especialmente difíciles, como la construcción, la recogida de basuras, las aplicaciones fuera de carretera, etc.

#### Suspensiones tipo cuatro-ballestas

La configuración básica en este tipo de suspensión se presenta en la Figura 2. A cada eje le corresponde una ballesta, y éstas se encuentran unidas entre sí, por sus extremos, me-

dianate un balancín, responsable de la equalización de las cargas. Existen variaciones de esta configuración diseñadas para evitar la transferencia de carga desde el eje anterior al posterior que se produce en este tipo de suspensiones durante el frenado (13). La suspensión de cuatro-ballestas no tiene tanta capacidad de articulación como la de viga flotante, pero es sencilla, ligera y requiere poco mantenimiento.

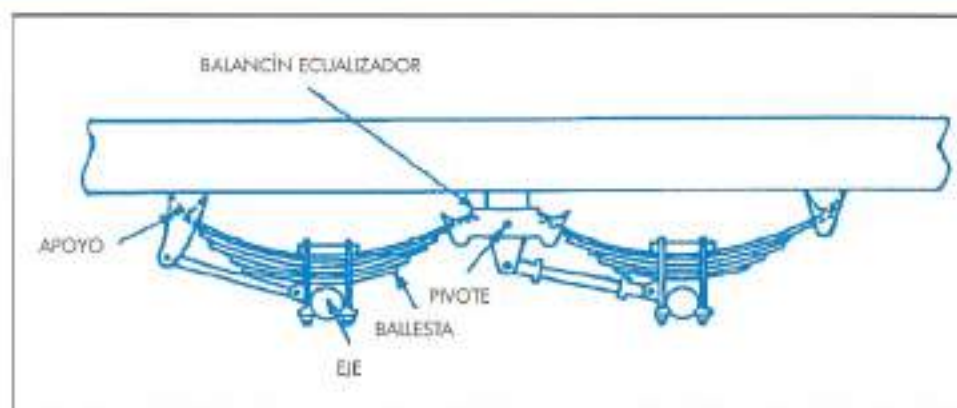
#### Suspensiones neumáticas

A cada eje del grupo le corresponde un dispositivo similar al que existe en la suspensión de aire para eje simple. Además, todas las balonas se encuentran conectadas entre sí mediante un sistema de conducciones, para asegurar la equalización de las cargas. Sin embargo, debido a la baja velocidad de respuesta del mecanismo neumático de equilibrio comparada con la velocidad característica de variación de las cargas en los ejes, el grupo se comporta en servicio prácticamente como un conjunto de ejes independientes. En la Figura 3 se presenta el esquema básico de este tipo de suspensión. A pesar de su buen comportamiento en servicio, estas suspensiones son difíciles de construir y mantener.

### 2.3. INTERACCIÓN ENTRE VEHÍCULO Y CARRETERA

Para el estudio de la interacción vehículo-carretera puede suponerse, en primera aproximación, que la dinámica del

FIGURA 2. Configuración básica de la suspensión de cuatro-ballestas.



vehículo y la respuesta del pavimento están desacopladas (5). Esto está justificado porque: a) la rigidez del pavimento es muy superior a la del vehículo y, por consiguiente, los desplazamientos del primero son muy pequeños comparados con los del segundo, y b) la velocidad de propagación de las ondas en el pavimento (entre 100 y 600 m/s) es muy superior a la velocidad de circulación del vehículo (entre 15 y 35 m/s). Por lo tanto, el problema original puede dividirse en dos problemas desacoplados:

- 1) El vehículo: Sistema mecánico no lineal que vibra al estar sometido a una excitación. Esta excitación está determinada por el perfil de la carretera sobre la que apoyan los neumáticos, la cual se supone completamente rígida, y por la velocidad de circulación.
- 2) El pavimento: Sistema multicapa sometido a cargas variables con el tiempo que se desplazan sobre su superficie. Estas cargas son las que el vehículo ejerce a través de sus neumáticos, se desplazan con su velocidad, y tienen dos componentes: una constante, la componente estática, y otra variable con el tiempo, la componente dinámica.

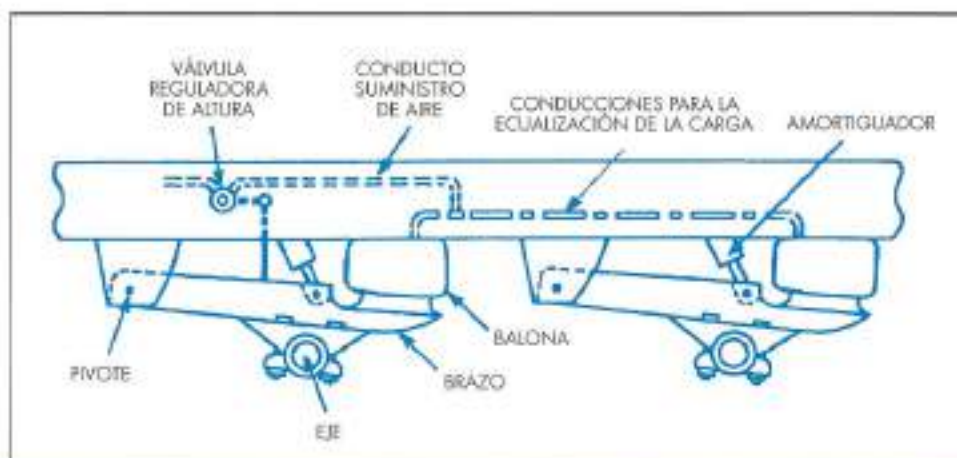
Una cuestión de gran importancia en el estudio del deterioro del pavimento provocado por el paso de vehículos es la influencia del carácter aleatorio o determinista de las fuerzas dinámicas. Si se acepta la hipótesis de *repetitividad espacial*, el vehículo ejerce la misma fuerza en cada sección

del pavimento cada vez que circula sobre él. Por tanto, cada sección está sometida a un cierto ciclo de carga invariable. Las secciones del pavimento en las que las fuerzas dinámicas son más altas estarán sometidas a los ciclos más energéticos, y serán las primeras en deteriorarse. En este caso, el deterioro no es uniforme: son siempre las mismas secciones las más fuertemente cargadas y, como consecuencia, las primeras en romper. El fallo está determinado por las secciones más cargadas o, lo que es lo mismo, por los picos de las fuerzas dinámicas.

Si se supone que las fuerzas dinámicas se distribuyen aleatoriamente sobre la superficie, el problema es diferente. Las fuerzas dinámicas que se ejercen en cada sección del pavimento son distintas en cada paso del vehículo, pero el valor medio será igual a la fuerza estática. Los ciclos de carga en cada sección son variables: unas veces más energéticos y otras veces menos, pero, por término medio, todas las secciones están cargadas por igual. El deterioro de la sección es mayor que el que se produciría si las cargas fuesen invariables porque, debido a la expresión potencial de la ley de fatiga, el incremento de la carga en un ciclo no se ve compensado por su decremento en otro. En este caso, serán las secciones estructuralmente más débiles las primeras en fallar. En el caso ideal de una carretera con propiedades uniformes, todas las secciones alcanzarían el fallo a la vez.

Con cualquiera de las dos hipótesis se llega a la conclusión de que las fuerzas dinámicas hacen que el deterioro del pavimento sea mayor que el que provocaría un vehículo que

FIGURA 3. Suspensión neumática.





se encontrara, en todo momento, en su configuración de equilibrio. Sin embargo, los incrementos calculados con la hipótesis de repetitividad espacial son mucho más altos que los calculados con la hipótesis de aleatoriedad.

Para caracterizar un vehículo o configuración de ejes en cuanto al daño que causa al pavimento, se utiliza la Carga de Eje Simple Equivalente o ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) que se define como el número de veces que un Eje Simple de referencia debe pasar por un determinado pavimento para provocar el mismo daño que la configuración original. La determinación analítica del ESAL no es posible sin un modelo de comportamiento a fatiga del pavimento. Sin embargo, si es posible establecer comparaciones entre distintos vehículos en función de las propiedades estadísticas de la carga dinámica que ejercen sobre el pavimento. Para ello se define el Coeficiente de Carga Dinámica (12) o DLC (*Dynamic Load Coefficient*):

$$DLC = \frac{\sigma}{\mu}$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar de las cargas dinámicas y  $\mu$  es su media (carga estática).

En esta primera parte del artículo se establece la influencia de los distintos parámetros de diseño según el DLC resultante. En la segunda parte se genera un modelo de pavimento con el que poder hacer comparaciones en función del daño.

### 3. SIMULACIÓN. CARACTERÍSTICAS DE LAS CARGAS DINÁMICAS

Se resumen aquí las características más importantes del estudio numérico realizado. Una explicación más detallada puede encontrarse en (10).

El vehículo elegido para este estudio es un vehículo articulado, compuesto de una cabeza tractora de dos ejes y un semirremolque con un eje tándem. Esta composición puede considerarse representativa de los vehículos pesados de mayor tonelaje que habitualmente circulan por las carreteras españolas. Las características se han tomado de las especificaciones de un determinado fabricante. Los datos, especificaciones y esquemas pueden encontrarse en (10). Las variables que se examinan son las que, según los estudios anteriores, tienen una mayor influencia en la componente dinámica. Estas son: rugosidad de la carretera, velocidad de circulación, rigidez de la suspensión, amortiguamiento, peso por eje, rigidez de los neumáticos y tipo de suspensión en el eje doble. Para analizar la influencia de estas variables se ha realizado un estudio paramétrico. Los valores nominales y extremos de los parámetros se muestran en la Tabla 1.

Para la realización de las simulaciones se empleó un programa de análisis numérico de mecanismos de aplicación general. El programa rueda en el ordenador vectorial CON-VEX instalado en el Centro de Informática Científica de Andalucía.

En cada una de las simulaciones se determina la respuesta del vehículo a un perfil particular de carretera. Este perfil no es más que una realización concreta de un proceso aleatorio. La respuesta de la simulación sólo determinará las propiedades de la respuesta del vehículo al proceso aleatorio si éste, el proceso, es ergódico. En caso contrario, se necesitará una muestra estadísticamente representativa de respuestas a perfiles particulares para determinar completamente la respuesta del vehículo.

Aunque el sistema es no-lineal, la hipótesis de ergodicidad parece justificada: por ejemplo, si un vehículo circula en sucesivas ocasiones por un mismo tramo de una carretera, aunque en posiciones laterales diferentes, cabe esperar que, en los sucesivos recorridos, la respuesta del vehículo tenga las mismas propiedades estadísticas y espectrales.

Las frecuencias de interés en la dinámica de vehículos industriales están en el rango de 0 a 25 Hz. El intervalo de tiempo mínimo para recoger estas frecuencias es:

$$\Delta T = \frac{1}{2f_{\text{Nyquist}}} = \frac{1}{2 \cdot 25 \text{ Hz}} = 0,02 \text{ s}$$

El tiempo efectivo de simulación es de 8 s. Con este tiempo se consigue una muestra estadísticamente representativa de las cargas sobre el pavimento (401 pts.) y una resolución aceptable en el dominio de la frecuencia ( $f = 0,0625 \text{ Hz}$ ).

En la Figura 4 se muestra el perfil de cargas (tercer eje) generado por el modelo básico de la simulación. Hay un claro contenido en frecuencias en el perfil: existen dos longitudes de onda predominantes, de las cuales la mayor tiene también una mayor amplitud. Las propiedades estadísticas del perfil se presentan en la Figura 5. Las fuerzas se distribuyen según una normal, aunque, como cabía esperar, existe cierta desviación en la distribución respecto de la curva teórica.

En la Figura 6 se muestra la función de densidad espectral del perfil de fuerzas. Se comprueba que todas las frecuencias de interés se encuentran comprendidas en el intervalo de 0 a 25 Hz. Existen dos zonas principales en el espectro: la banda de 1 a 3 Hz y la banda de 9 a 14 Hz. La densidad espectral presenta máximos para las frecuencias de 1,5, 10,1 y 13,8 Hz. Los dos primeros corresponden a los modos de vibración de la masa suspendida, y la masa no suspendida, respectivamente. Esto puede comprobarse fácilmente estimando estas frecuencias mediante un modelo de

| PARÁMETRO                 | VALOR MÍNIMO                                                                      | VALOR NOMINAL | VALOR MÁXIMO |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|
| RUGOSIDAD (IR)            | 118,4 cm/km                                                                       | 236,7 cm/km   | 355,1 cm/km  |
| VELOCIDAD                 | 16,5 m/s                                                                          | 25,0 m/s      | 33,5 m/s     |
| AMORTIGUAMIENTO ( $\xi$ ) | 0,05                                                                              | 0,20          | 0,35         |
| RIGIDEZ DE LA SUSPENSIÓN  | 320 kg/cm                                                                         | 500 kg/cm     | 2.120 kg/cm  |
| RIGIDEZ DE LOS NEUMÁTICOS | 1.180 kg/cm                                                                       | 1.680 kg/cm   | 2.180 kg/cm  |
| PESO POR EJE              | 14,0 t                                                                            | 18,0 t        | 22,0 t       |
| TIPO DE SUSPENSIÓN        | NOMINAL: EJES INDEPENDIENTES<br>OTRAS: NEUMÁTICA, CUATRO-BALLESTAS, VIGA FLOTANTE |               |              |

TABLA 1. Valor nominal y valores extremos de los parámetros.

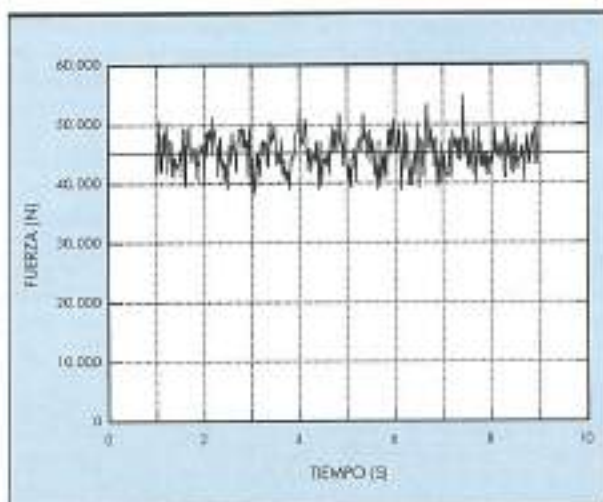


FIGURA 4. Perfil de cargas bajo el eje delantero del tandem para el modelo básico de la simulación.

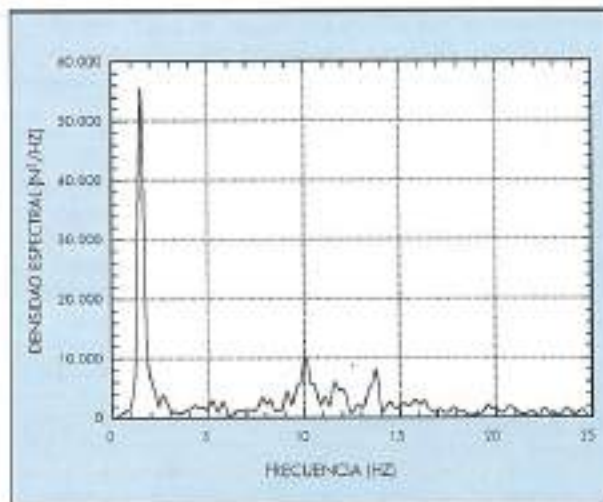


FIGURA 6. Densidad espectral del perfil de cargas bajo el eje delantero del tandem para el modelo básico de la simulación.

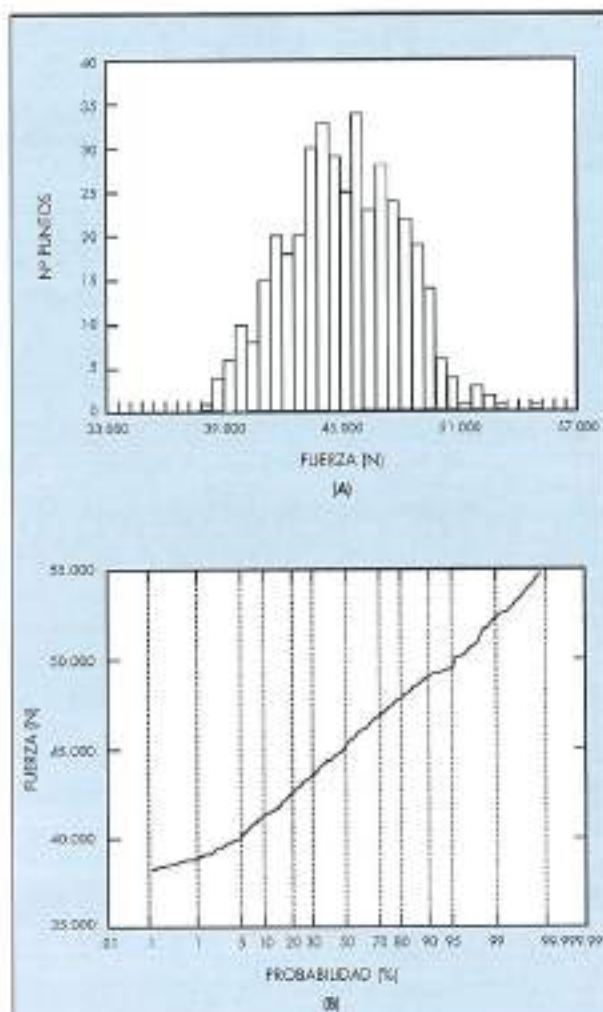


FIGURA 5. Propiedades estadísticas del perfil de cargas bajo el eje delantero del tandem para el modelo básico de la simulación.

cuarto de vehículo (11). La contribución de la vibración de la masa suspendida a las fuerzas dinámicas es más importante que la de la masa no suspendida. Hay que decir, sin embargo, que esto puede no ser así para ciertos tipos de suspensión, como se verá posteriormente.

#### 4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Para estudiar la influencia en la respuesta del vehículo de las distintas variables se analizaron las fuerzas en los neumáticos en el eje delantero del tandem. La magnitud de la componente dinámica de estas fuerzas se describe mediante el coeficiente de carga dinámica (DLC), definido en el apartado 2. El DLC obtenido para el modelo básico es de 0,06562. El máximo DLC es de 0,21240, correspondiente al modelo con suspensión de viga flotante y velocidad igual a 31,8 m/s. El mínimo DLC es de 0,04324, correspondiente al modelo básico cuando circula por la carretera más suave.

##### Influencia de la irregularidad de la carretera

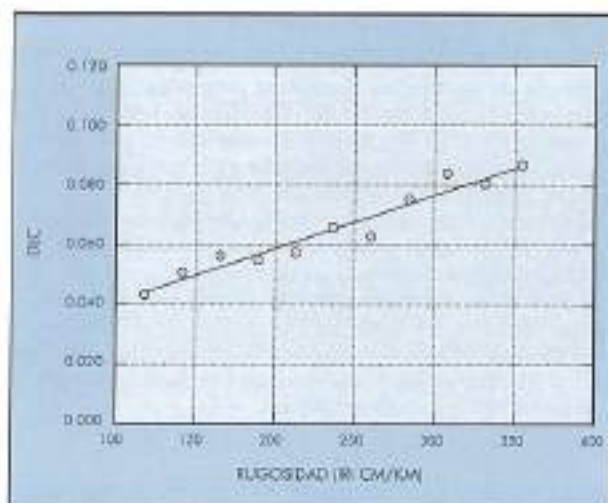
La irregularidad (rugosidad) de la carretera es el factor de mayor influencia en la componente dinámica de las cargas (ver Figura 7). El paso de una carretera suave a una carretera muy irregular (según el índice IRI), por ejemplo, hace que el DLC se incremente en un 100%. Quiere esto decir que la disminución de tolerancias en la construcción y pavimentación de una carretera es uno de los factores más importantes a la hora de garantizar su propia conservación.

El carácter no monótono de variación del DLC en función del IRI puede estar provocado por la falta de información sobre la correlación exacta entre este factor, el IRI, y los parámetros que determinan la densidad espectral del pavimento (ver sección 2).

##### Influencia de la velocidad de circulación del vehículo

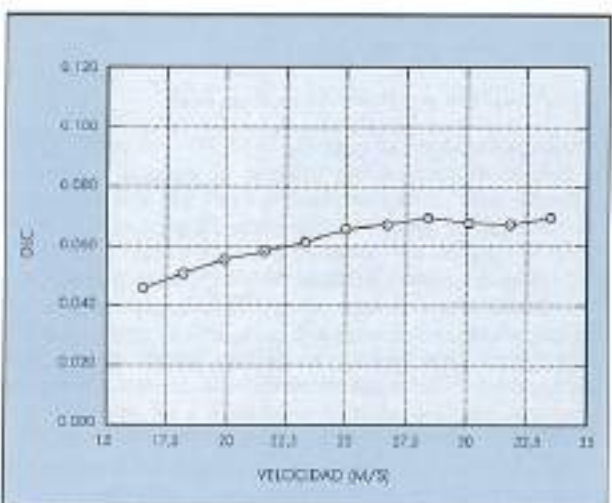
Cabe esperar que aumentos de la velocidad se traduzcan en aumentos de la componente dinámica de las cargas (DLC). Esto es así para amplios rangos de velocidades (ver Figura 8), sin embargo, la curva presenta un máximo local para 28,4 m/s; para esa velocidad se produce una sintonización




**FIGURA 7.** Influencia de la rugosidad de la carretera en el DLC.

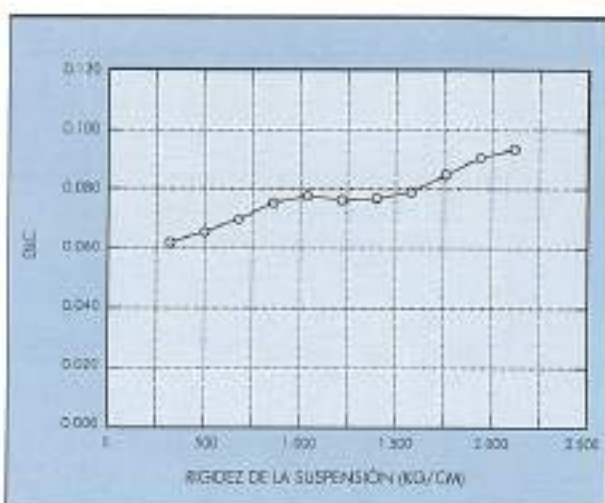
entre el vehículo y la carretera, aunque es de pequeña importancia.

La influencia de la velocidad de circulación no es tan importante como la de la rugosidad de la carretera. El paso de 60 km/h a 120 km/h, por ejemplo, provoca un aumento en el DLC del orden del 50%. La pendiente de la curva para bajas velocidades es mayor que para altas velocidades. Para velocidades superiores a un valor razonable en la práctica (alrededor de 25 m/s) la curva es bastante plana. Esto quiere decir que la máxima velocidad de circulación permitida no es un factor crítico para el deterioro del pavimento. En otras palabras, si se quiere reducir el deterioro del pavimento disminuyendo el límite de velocidad de los vehículos pesados, sería necesario fijar este límite en valores poco razonables o poco competitivos.


**FIGURA 8.** Influencia de la velocidad del vehículo en el DLC.

#### Influencia de la rigidez de la suspensión

Un aumento de la rigidez de la suspensión provoca un incremento en la componente dinámica de las fuerzas (Figura 9).


**FIGURA 9.** Influencia de la rigidez de la suspensión en el DLC.

La utilización de una suspensión muy rígida (2.100 kg/cm) en lugar de una suspensión blanda (300 kg/cm), por ejemplo, da lugar a un incremento en el DLC del orden del 50%. Es conveniente, por tanto, disminuir la rigidez de las suspensiones tanto como sea posible. El comportamiento dinámico de una suspensión es tanto mejor cuanto menor es su frecuencia natural. La disminución de la rigidez está limitada por la máxima deflexión estática admisible (salvo en suspensiones neumáticas) y por la rigidez al balanceo.

El incremento en el DLC al pasar de una rigidez característica de ballesta parabólica (500 kg/cm) a una rigidez característica de ballesta semi-elíptica (640 kg/cm) es del 5%. La diferencia es pequeña. En la realidad esta diferencia será mayor, porque la existencia de fricción interna en las ballestas semi-elípticas (modelada como disipación viscosa en el análisis) hace que las fuerzas dinámicas generadas sean más altas.

La curva presenta un máximo local para 1.040 kg/cm. La frecuencia natural de la masa suspendida que corresponde a esta rigidez es aproximadamente 2 Hz. La longitud de onda que se percibe con esta frecuencia cuando se circula a 25 m/s es de 12,5 m. Esta longitud es aproximadamente igual a la distancia entre los ejes extremos del vehículo, por lo que la sintonización debe de estar relacionada con un modo de vibración de toda la masa del vehículo.

#### Influencia del amortiguamiento de la suspensión

En la Figura 10 se presenta la influencia del amortiguamiento en la componente dinámica de las fuerzas. Existe un nivel óptimo para el cual las fuerzas dinámicas se minimizan. Este amortiguamiento óptimo corresponde a un coeficiente ( $\xi$ ) igual a 0.35. La curva es muy plana en los alrededores del mínimo y hacia amortiguamientos crecientes. Quiere esto decir que la elección del amortiguamiento de las suspensiones no es crítica siempre que el coeficiente sea suficientemente grande. Sin embargo, si se eligen coeficientes muy pequeños, la componente dinámica de las fuerzas crece considerablemente. El DLC correspondiente a un  $\xi$  igual a 0.05, por ejemplo, característico de suspensiones reales muy poco amortiguadas, es dos veces el DLC correspondiente al amortiguamiento óptimo.

Desgraciadamente, un gran número de vehículos industriales utilizan suspensiones de ballesta con muy poco amor-

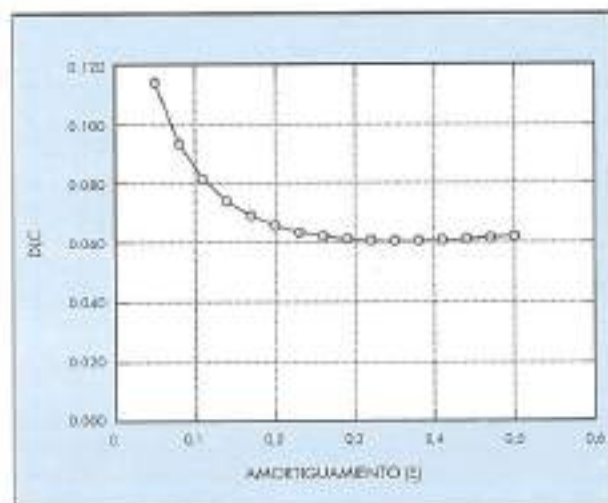


FIGURA 10. Influencia del amortiguamiento de la suspensión en el DLC.

tiguamiento viscoso. El deterioro de los pavimentos podría mejorarse considerablemente con la introducción de legislación que potenciaría el uso de suspensiones con mayores coeficientes de amortiguamiento.

#### Influencia del peso por eje

Las cargas dinámicas disminuyen con el aumento del peso por eje (Figura 11). La influencia no es tan espectacular como en el caso de los parámetros anteriores. El paso de 18 t a 20 t en el eje tandem, por ejemplo, hace que el DLC disminuya en un 5,4%.

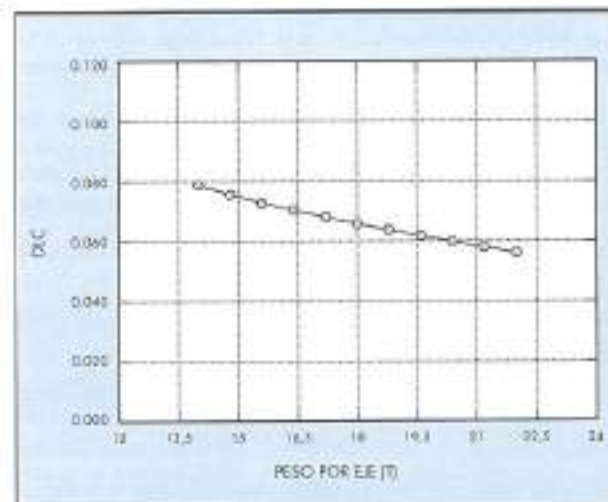


FIGURA 11. Influencia del peso por eje en el DLC.

Hay que decir que aunque la componente dinámica disminuya con el peso por eje, la componente estática aumenta, por lo que el efecto global será, en general, perjudicial. En cualquier caso, se vuelve a comprobar que la disminución de las frecuencias naturales de las suspensiones favorece el comportamiento dinámico del vehículo.

#### Influencia de la rigidez de los neumáticos

El aumento de la rigidez de los neumáticos provoca un incremento de las fuerzas dinámicas generadas (Figura 12). La relación entre la rigidez del neumático y el DLC es prácticamente lineal en el intervalo considerado. El paso de una rigidez muy baja a una rigidez muy alta, por ejemplo, provoca un incremento en el DLC del orden del 30%.

Los neumáticos diagonales presentan rigideces verticales características un 20 ó 30% más altas que los radiales, por lo que las cargas dinámicas que generan serán un 10 ó 15% mayores. El sobreinflado también provoca una rigidización del neumático y, por tanto, un aumento en el DLC. Se puede concluir, por tanto, que los neumáticos radiales son preferibles a los diagonales, y que las bajas presiones de inflado son preferibles a las sobrepresiones.

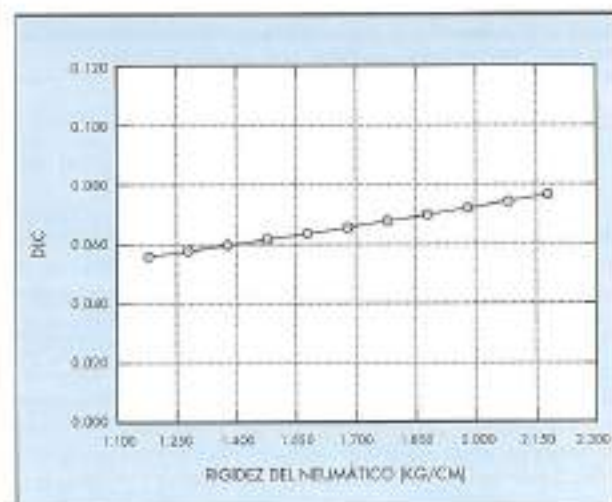


FIGURA 12. Influencia de la rigidez de los neumáticos en el DLC.

#### Influencia del tipo de suspensión en el eje doble

El reparto de cargas en cada eje de un eje múltiple depende del sistema de suspensión empleado. En general, el sistema se diseña para conseguir repartos estáticos satisfactorios. Sin embargo, no todos los mecanismos logran este objetivo con igual eficacia. La suspensión de viga flotante, por ejemplo, consigue repartos estáticos muy superiores a la de cuatro ballestas. Por otro lado, la amplificación dinámica de las fuerzas no está relacionada con el reparto de carga estática. En la Figura 13 se muestra el DLC en función de la velocidad para los cuatro tipos de suspensión analizadas. Se observa que las suspensiones neumática y de ejes independientes tienen un comportamiento similar: la diferencia en el DLC es sólo el 6%. Las otras dos suspensiones presentan un comportamiento notablemente peor, particularmente la de viga flotante: los DLC correspondientes a las suspensiones de cuatro-ballestas y de viga flotante pueden llegar a ser un 141% y un 194% mayores que el de la suspensión de aire, respectivamente.

En las suspensiones de cuatro ballestas, y las de viga flotante, la velocidad tiene una influencia considerable, siendo la tendencia no monótona. Los máximos y mínimos locales (que, como podía haberse intuido, están desfasados en la



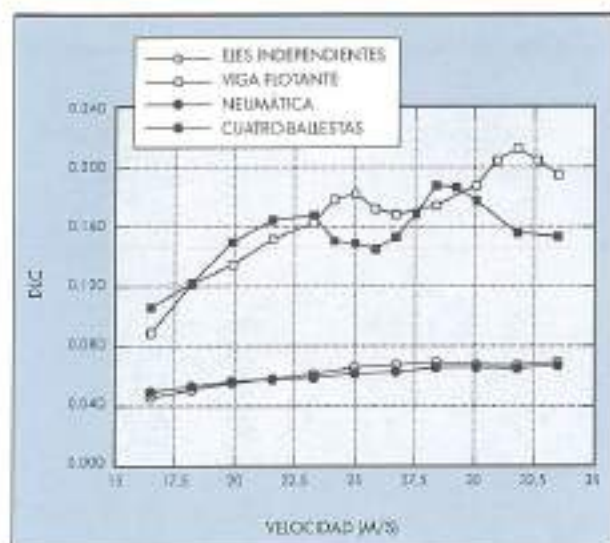


FIGURA 13. Influencia de la velocidad en el DLC para las cuatro tipologías de suspensión.

viga flotante respecto a las cuatro ballestas) están relacionados con sintonizaciones del mecanismo con las longitudes de onda predominantes en la carretera.

Las suspensiones de aire y de ejes independientes presentan valores del DLC similares (del orden de 0,06), mucho menores que los de las suspensiones de viga flotante y de cuatro-ballestas. Las diferencias pueden llegar a ser muy considerables para algunas velocidades. Esto quiere decir que el tipo de suspensión tiene una enorme influencia en la componente dinámica de las cargas sobre el pavimento. Se puede reducir notablemente el deterioro del pavimento favoreciendo (mediante legislación) el uso de mecanismos de ejes múltiples con buen comportamiento dinámico, como los de ejes independientes o los de tipo neumático.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han permitido determinar las características generales de las fuerzas dinámicas, describir la influencia de las distintas variables e identificar los factores de mayor importancia para la componente dinámica de las cargas sobre el pavimento. Estos resultados se pueden resumir de la siguiente manera:

- La componente dinámica de las fuerzas se distribuye aproximadamente según una normal, con valores de la desviación típica comprendidos entre el 6,5% y el 21,2% para el modelo considerado. Las frecuencias características de estas fuerzas se encuentran en dos bandas bien definidas: una, entre 1 y 3 Hz, correspondiente a la vibración de la masa suspendida; y otra, entre 9 y 14 Hz, correspondiente a la vibración de la masa no suspendida.
- La componente dinámica de la carga depende, principalmente, de la rugosidad de la carretera y del sistema de suspensión en los grupos de ejes. El paso de una carretera suave a una carretera rugosa provoca incrementos en la magnitud de las fuerzas dinámicas del orden del 100%. Las suspensiones analizadas se pueden clasificar de la siguiente manera, según su influencia en la componente dinámica de las fuerzas: suspensión neumática, suspensión de ejes independientes, suspensión de cuatro-ballestas y,

por último, suspensión de viga flotante. La utilización de suspensiones con mal comportamiento dinámico, en lugar de suspensiones neumáticas, provoca incrementos en el DLC de entre el 140% y el 190%.

- Los vehículos presentan valores del DLC tanto menores cuanto menos rígidas son sus suspensiones. El amortiguamiento no es un factor crítico, salvo si se utilizan suspensiones muy poco amortiguadas, para las cuales las fuerzas dinámicas pueden crecer extraordinariamente.
- El peso por eje y la rigidez del neumático tienen, relativamente, poca importancia.

Se puede concluir que la dinámica del vehículo afecta de forma considerable a las cargas transmitidas al pavimento, introduciendo en ellas una componente fluctuante, la componente dinámica, cuya magnitud es muy sensible a las variaciones en determinadas variables de la interacción vehículo-carretera, particularmente la irregularidad de la carretera y el tipo de suspensión, y que puede reducirse notablemente si se toman para ellas los valores apropiados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) ABBO, E.; HEDRICK, K.; MARKOW, M. y BRADEMEYER, B. (1987). "Analysis of moving dynamic loads on rigid pavements", *Symposium on heavy vehicle suspension characteristics, Canberra, Australia*. 51-70.
- (2) ASTM (1991). "Standard test method for measuring road roughness by static level method", *ASTM Annual Book of Standards*, 4.03, Standard E 1364-91.
- (3) ANON (1990). "Proposal for a council directive, COM (90) 486", *Commission of the European Communities, Brussels*. 28 p.
- (4) B.O.E. (1991). "Real Decreto 1317/1991, de 2 de agosto, por el que se modifican los artículos 55, 57 y 58 del Código de la Circulación y se adecúan los límites para pesos y dimensiones de los vehículos a la normativa comunitaria", B.O.E. núm. 212, miércoles 4 septiembre 1991.
- (5) CEBON, D. (1988). "Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy vehicles. Part 1: dynamic analysis of vehicles and road surfaces", *Proc. Inst. Mech. Eng.* 202:109 - 117.
- (6) CEBON, D. (1988). "Theoretical road damage due to dynamic tyre forces of heavy vehicles. Part 2: simulated damage caused by a tandem-axle vehicle", *Proc. Inst. Mech. Eng.* 202:109 - 117.
- (7) FANCHER, P.S. et al. (1980). "Measurement and representation of the mechanical properties of truck leaf springs", *Society of Automotive Engineers*, Paper No. 800905.
- (8) GILLESPIE, T.D. et al. (1980). "Calibration of response-type road roughness measuring systems", *National Cooperative Highway Research Program, University of Michigan Transportation Research Institute*. NCHRP Report 228, UMTRI-80-30.
- (9) GILLESPIE, T.D. (1985). "Heavy truck ride", *Society of Automotive Engineers*. SAE SP-607.
- (10) GUTIÉRREZ-RUMBAO, J. (1994). "Influencia de las características de los vehículos pesados en el deterioro por fatiga de las carreteras", *PFC, ESI, Universidad de Sevilla*.
- (11) PINTADO, P. (1993). "Automóviles. Dinámica e ingeniería", *Grupo de Transportes. Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Universidad de Sevilla*.
- (12) SWEATMAN, P.F. (1983). "A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles", *Australian Road Research Board*. Special Report 27.
- (13) UMTRI, (1992). "The mechanics of heavy vehicles", *UMTRI*.



# Nº

## Productos Químicos

## para la Construcción

# BETTOR

*La calidad  
nos identifica*



ADITIVOS  
PAVIMENTOS

MORTEROS

MASILLAS

RESINAS

ADHESIVOS

LAMINAS

RECUBRIMIENTOS