



ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PARA LOS SISTEMAS DE VÍA HORMIGONADA ANTIVIBRATORIA

Alejandro Boix Querol

Transformados del Norte S.A (TRANOSA)

C/ Marina 20-22

08940- Cornellá de L. (Barcelona)

Tel: 93 377-90-90; Fax: 93 377-96-91

e-mail: tranosa@redestb.es; http:\\www.tranosa.com

RESUMEN

El presente artículo trata de dar una versión general de cómo realizar el estudio del comportamiento de la vía hormigonada, ya sea directamente o sobre losa.

En particular se estudia la aplicación en los dos sistemas con la tecnología que utiliza TRANOSA, que son el de bloques hormigonados en obra (II. 1) y el “Massivo” de losas flotantes (II. 2).

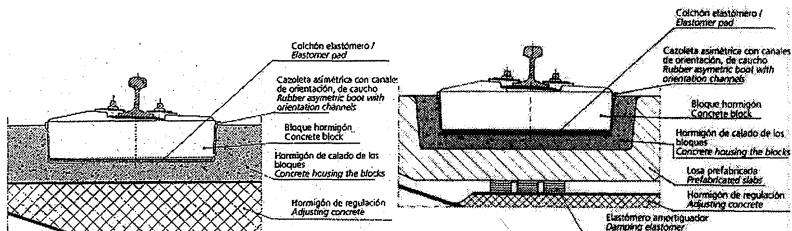


Ilustración 1. Bloques

Ilustración 2. Losas

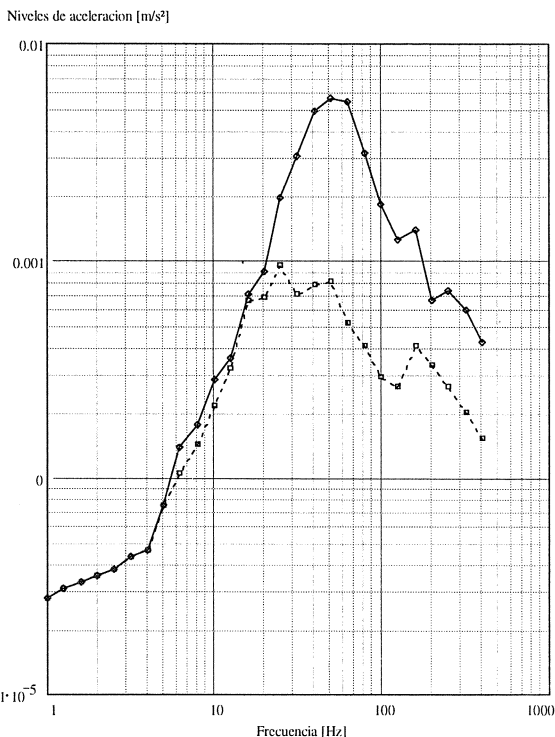
1. VIBRACIONES PRODUCIDAS AL PASO DE LOS TRENES

1.1. GENERALIDADES

Como es conocido, el paso de trenes sobre la estructura de vía, produce vibraciones que pueden resultar molestas a las personas, y perjudiciales a los edificios (ver Ilustración 3). En el diseño de sistemas de vía sin balasto, resulta de especial interés atenuar lo máximo estas vibraciones, ya que una vía colocada directamente sobre hormigón resultaría, además de excesivamente rígida, un camino excelente para las vibraciones.

Para las soluciones de vía en placa, podemos colocar materiales con las características que más nos interesen (rigidez, anchura...), para lograr que la resonancia del sistema ante las frecuencias haga que se comporte como un “filtro”.

En general la transmisión de vibraciones resulta muy compleja, dependiendo de factores como el tipo de suelo, estructura de los edificios etc., las directrices para los estudios de vibraciones quedan expuestas en la ISO 4866 (Vibration of buildings-Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings) y muy particularmente en la ISO 10815 (Measurement of vibration generated internally in railway tunnels by the passage of trains).



Trazo continuo: Vibraciones transmitidas por vía sólida

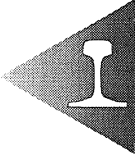
Trazo discontinuo: Vibraciones transmitidas al ambiente (motor, efectos aerodin.)

Ilustración 3



De un modo general, las frecuencias que se transmiten a través de los sólidos y están comprendidas en la gama de 30 a 80Hz, son las que más interesa filtrar, ya que, además de resultar las de mayor intensidad al paso del ferrocarril (Ilustración 3), también son las de mayor efecto sobre el cuerpo humano y sobre los edificios.

Empíricamente se demuestra que 60Hz es la de mayor repercusión a todos los efectos.



2. COMPORTAMIENTO DE LA SUPERESTRUCTURA

El diseño de los sistemas de vía hormigonada se ha caracterizado por la búsqueda de las deformaciones y parámetros por efectos de la flexión del carril (ver 2.1) y características dinámicas en la transmisión de vibraciones tales como amplificación y transmisibilidad (ver 2.2).

2.1. FLEXIÓN DEL CARRIL ANTE LAS CARGAS. RIGIDEZ Y LONGITUD CARACTERÍSTICAS

Como es sabido, en general la deformación real de cualquier superestructura producida por una carga vertical Q_v puede ser modelizada según Winkler como un sistema de viga continua apoyada en muelles según (1).

$$\delta_{v,w}(x, K_v, L_v) = \frac{Q_v}{K_v} \cdot e^{-x/L_v} \cdot \left[\cos\left(\frac{x}{L_v}\right) + \sin\left(\frac{x}{L_v}\right) \right] \quad (1)$$

Donde con solo dos parámetros nos queda definida de forma sintética el comportamiento de la vía:

- Rigidez K_v , que representa la deformabilidad de la superestructura en la sección cargada.
- Longitud L_v que expresa de alguna manera cuánta vía se ve afectada por la deformación elástica inducida por la propia carga.

Mientras a las soluciones tradicionales les corresponden rigideces del orden de 200 - 400 kN/mm y longitudes del orden de 60-100 cm, las soluciones de vía en placa se caracterizan por rigideces del orden de 40-200 kN/mm y por longitudes del orden de 100-300 cm.

2.2. COMPORTAMIENTO DINÁMICO. CURVAS DE AMPLIFICACIÓN Y TRANSMISIBILIDAD.

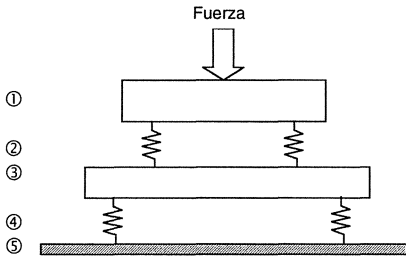


Ilustración 4

Modelizamos la estructura de vía en placa como un sistema compuesto de masas y resortes (Ilustración 4). Resulta evidente el hecho que la estructura reaccionará de diferente forma en función de la frecuencia de la carga aplicada. El comportamiento deseado, que es el de “filtro” a las vibraciones será mucho mayor cuanto más lejos está la frecuencia aplicada a la propia de resonancia del sistema.

Actuando sobre las características de muelles y masas lograremos alejar esta frecuencia propia de resonancia de las más perjudiciales al ferrocarril, que como se ha citado van de 30-80 Hz.

En la Ilustración 5 apreciamos el efecto de filtro de una estructura amortiguadora, donde se observa el pico de resonancia (de altura variable, en función del coeficiente de atenuación), y como los problemas se plantean a baja frecuencia, ya que en la gama alta la atenuación es muy grande.

El comportamiento dinámico convencional global de la superestructura viene representado por la respuesta dinámica del sistema a una carga vertical $Q_v(\omega)$ en una posición genérica a lo largo de la superestructura en un punto $x=0$:

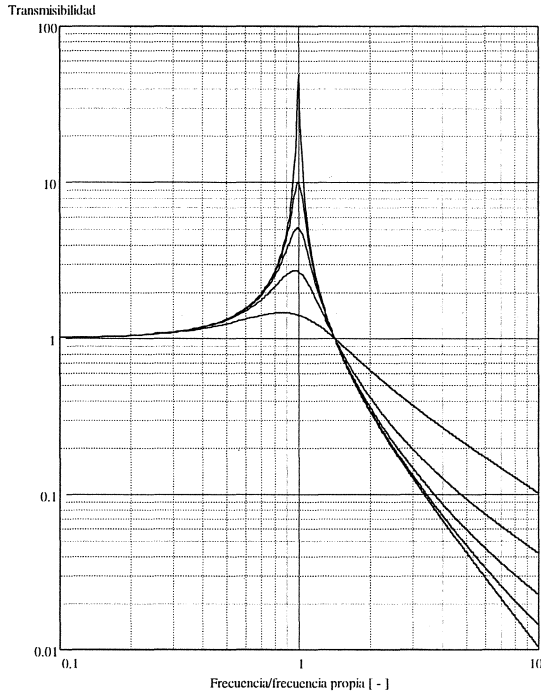


Ilustración 5



$$Q_v(\omega) = Q_v \cdot \varepsilon_v(\omega) \cdot e^{j\omega t} \quad (2)$$

donde $Q_v = 225$ kN es la carga por eje; $\varepsilon_v(\omega)$ un parámetro en función de la frecuencia que mide la fracción dinámica de la carga estática; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ la pulsación de la carga en (rad/s).

Al igual que la flexión del carril queda caracterizada por L_v y K_v , dinámicamente son las curvas espectrales (o funciones de la frecuencia) las que definen de forma sintética la respuesta de la estructura.

- Función de traslado (FdT) o curva espectral de amplificación:

$$H_{at}(\omega) = \frac{\delta_v(0, \omega)}{Q_v \cdot \varepsilon_v(\omega)} \quad (3)$$

Respuesta de desplazamiento del sistema (vía) en el dominio de la frecuencia en el punto de aplicación de la carga dinámica.

- Función espectral de transmisibilidad:

$$T_{at}(\omega) = \frac{\int_{-\Delta}^{+\Delta} q_v(x, \omega) \cdot dx}{Q_v \cdot \varepsilon_v(\omega)} \quad (4)$$

Relación en el dominio de la frecuencia entre la resultante de las fuerzas transmitidas al plano de soporte de la superestructura (solera) y la carga dinámica aplicada.

En estas ecuaciones (3) y (4): $2 \cdot \Delta$ es la longitud lineal del modelo; $\delta_v(x, \omega)$ es la deformación dinámica del nivel de vía y $q_v(x, \omega)$ son las acciones transmitidas a la solera por unidad de longitud.

La presencia de la masa no suspendida correspondiente a un eje del tren determina una variación del comportamiento dinámico de la superestructura, que en una primera aproximación se valora como:

$$M_{ny} = \varepsilon_m \cdot \frac{Q_v}{g} \cong 2300Kg \quad (5)$$

donde $g = 9,81$ m/s² aceleración de la gravedad y $\varepsilon_m = 0,10$ fracción de la masa no suspendida respecto al valor total de la masa de los trenes.

Las funciones espectrales $H_{at}(f)$ y $T_{at}(f)$, relativas a la superestructura sola, es decir en ausencia del tren, permiten valorar las mismas curvas espectrales relativas al comportamiento de la superestructura en presencia del tren $H_{pt}(f)$ y $T_{pt}(f)$ mediante las siguientes relaciones:

- Curva espectral de amplificación (FdT)

$$H_{pt}(f) = \frac{[H_{at}(f)]}{[1 - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot M_{ns} \cdot H_{at}(f)]} \quad (6)$$

- Curva espectral de transmisibilidad

$$T_{pt}(f) = \frac{[T_{at}(f)]}{[1 - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot M_{ns} \cdot H_{at}(f)]} \quad (7)$$

De todas estas relaciones, finalmente las funciones espectrales $H(f)$ y $T(f)$ permiten aislar los parámetros fundamentales de tipo dinámico del sistema:

- “Frecuencia propia de resonancia” como el valor de la frecuencia para la cual la curva espectral de amplificación resulta máxima:

Frecuencia propia en ausencia de tren: $f_{o,at}$ (o bien ω_{at})

Frecuencia propia en presencia de tren: $f_{o,pt}$ (o bien ω_{pt})

- “Amplificación del sistema de superestructura” como la máxima respuesta dinámica de la superestructura relacionada con la respuesta estática:

Amplificación en ausencia de tren: $A_{at} = H_{at}(w_{at}) \cdot K_V$

Amplificación en presencia de tren: $A_{pt} = H_{pt}(w_{pt}) \cdot K_V$

- “Aislamiento del sistema de superestructura I” definido como la capacidad global del sistema de superestructura para reducir las cargas dinámicas transmitidas por el tren al plano de aplicación respecto a las aplicadas por el mismo tren al nivel de vía. En especial:



$$I = \sqrt{\frac{\sum_i |T(f_i)|^2 \cdot Q_{di}^2}{\sum_i Q_{di}^2}} \quad (8) \text{ o expresado en decibelios } X[dB] = 20 \cdot \log_{10}(I) \quad (9)$$

Donde Q_{di} es el espectro de la carga dinámica aplicada al nivel de vía, determinado por los efectos de interacción entre rueda y carril.

Para dar una idea del orden de magnitud de este valor, sirva como ejemplo el caso de la superestructura de balasto, que da un valor $I_{\text{balasto}} = 2,5$.

3. BLOQUES EXTRAIBLES

En el caso de la superestructura de Bloques Extraíbles las prestaciones requeridas a la superestructura en términos de parámetros característicos se definen por los siguientes valores indicados en el punto 2.1: $K_v \approx 250 \text{ kN/mm}$; $L_v \approx 75 \text{ cm}$

Como las prestaciones dinámicas no pueden basarse en las capacidades de absorción de vibraciones mediante la masa del sistema, como en el caso de la losa, ya que son 450 kg/m contra los 3100 kg/m de la solución de losa, en este caso debe estudiarse un buen sistema de amortiguación de vibraciones a través de las capacidades disipativas de los materiales elastoméricos presentes en el conjunto.

3.1. ANÁLISIS ESTÁTICOS

3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ELASTOMÉRICOS

Los parámetros dimensionales y mecánicos capaces de caracterizar el comportamiento de los materiales elastoméricos presentes en el sistema de Bloques Extraíbles son los correspondientes a la suela del carril (rigideces de 100 a 500 kN/mm) y a los del elemento disipativo bajo bloque (rigideces muy variables en función de la frecuencia desde 190 a 1300 kN/mm).

ANÁLISIS ESTÁTICOS ANTE CARGAS VERTICALES

3.1.2. MODELO ADOPTADO

Para un sistema de estas características, las deformaciones verticales del carril δ_{vr} y del bloque δ_{vb} producidas por una carga Q_v aplicada vienen dadas por las siguientes relaciones:



$$\delta_{vr}(x) = \frac{Q_v}{K_v} \cdot e^{-x/L_v} \cdot \left[\cos\left(\frac{x}{L_v}\right) + \sin\left(\frac{x}{L_v}\right) \right] \quad (10)$$

$$\delta_{vb}(x) = \frac{K_{sr}}{K_p + K_b} \cdot \frac{Q_v}{K_v} \cdot e^{-x/L_v} \cdot \left[\cos\left(\frac{x}{L_v}\right) + \sin\left(\frac{x}{L_v}\right) \right] \quad (11)$$

que se definen mediante dos únicos parámetros característicos capaces de sintetizar el comportamiento vertical de la superestructura.

□ Longitud característica vertical:

$$L_v = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_r \cdot (2 \cdot J_v)}{\left[\frac{(2 \cdot K_p)^{-1} + (2 \cdot K_b)^{-1}}{\Delta_b} \right]^{-1}}} \quad (12)$$

□ Rigidez característica vertical:

$$K_v = 2 \cdot \left[\frac{\left[\frac{(2 \cdot K_p)^{-1} + (2 \cdot K_b)^{-1}}{\Delta_b} \right]^{-1}}{\Delta_b} \right] \cdot L_v \quad (13)$$

Donde:

E_r Es el módulo elástico normal del carril; J_v Momento de inercia vertical del carril; Δ_b la distancia entre los bloques; K_p Rigidez de la suela bajo carril y K_b Rigidez de la suela bajo bloque.

Para el sistema en conjunto se obtienen los siguientes valores característicos:

Rigidez K_v :	245 kN/mm
Longitud L_v :	74 mm
Max. Hundimiento del carril:	0,956 mm
Max. Hundimiento del bloque:	0,319 mm



Del mismo modo que para el comportamiento vertical, se realizan los estudios para las componentes transversales, pero en este caso, además de la fuerza transversal producida por la misma rueda, tenemos la componente originada por el par de torsión de la carga vertical sobre la cabeza del carril.

Sin entrar en más detalle, los parámetros característicos transversales son

Rigidez K_v :	143 kN/mm
Longitud L_v :	39 mm
Max. Desplazamiento lateral del carril:	0,674 mm (0,309mm por traslación + 0,365mm por efecto de rotación de la carga vertical sobre el carril).

3.2. ANÁLISIS DINÁMICOS

3.2.1. MODELO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

El modelo del comportamiento dinámico de la vía sigue el criterio mostrado en la Ilustración 4, según ésta las correspondencias son: 1-Vía; 2-Suelas de carril; 3-Bloques ; 4-Elastómero disipativo y 5-Hormigón de solera.

La rigidez dinámica del sistema de unión de la vía con el hormigón de solera, repartida por unidad de longitud de la vía, se ha valorado considerando la relación dinámica entre los hundimientos de la vía (carriles) δ_r y de los bloques δ_b e y las cargas distribuidas de la vía (carriles) q_r y de los bloques q_b (este último se ha considerado nulo en cuanto que las cargas externas se aplican sólo a la vía):

$$\begin{bmatrix} q_r \\ 0 \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} k_{sr}(\omega) & -k_{sr}(\omega) \\ -k_{sr}(\omega) & k_{sb}(\omega) + k_{sr}(\omega) \end{bmatrix} - \omega^2 \cdot \begin{bmatrix} m_r & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_b \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde:

$$\begin{aligned} k_{sr}(\omega) &= 2 \cdot K_{sr} \cdot \Delta(\omega, \eta_{sr}) \cdot (1 + j \cdot \mu_{sr}) / \Delta b \\ k_{sb}(\omega) &= 2 \cdot K_{sb} \cdot \Delta(\omega, \eta_{sb}) \cdot (1 + j \cdot \mu_{sb}) / \Delta b \end{aligned} \quad (15)$$

Siendo: Δ_b - espacio entre los bloques; m_r - masa unitaria de la vía; m_b - masa unitaria de los bloques; K_{sr} - Rigidez suela carril; K_{sb} - Rigidez del elastómero disipativo; μ_{sr} - Factor de pérdida suela carril; μ_{sb} - Factor de pérdida del elemento disipativo; η_{sr} - Endurecimiento dinámico de la suela del carril; η_{sb} - Endurecimiento dinámico de elemento disipativo y $\Delta(\omega, \eta)$ - Función de endurecimiento en función de la frecuencia

La rigidez dinámica de todo el sistema de unión del carril viene dada por tanto de la función:

$$k_a(\omega) = \frac{q_r}{\delta_r} = \frac{1}{\left[\left\{ \begin{bmatrix} k_{sr}(\omega) & -k_{sr}(\omega) \\ -k_{sr}(\omega) & k_{sb}(\omega) + k_{sr}(\omega) \end{bmatrix} - \omega^2 \cdot \begin{bmatrix} m_r & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \right\}^{-1} \right]_{1,1}} \quad (16)$$

La solución para la ecuación diferencial dinámica de flexión del carril según Winkler es:

$$k_a(\omega) + EJ_r \cdot \alpha(\omega)^{IV} \cdot (1 + i \cdot \mu_r) = 0 \quad (17)$$

tiene cuatro soluciones expresables de la forma siguiente: $\alpha(\omega)^{IV} = -\frac{k_a(\omega)}{EJ_r \cdot (1 + i \cdot \mu_r)}$

Tras descartar dos de las soluciones e imponer las adecuadas condiciones de contorno a las dos restantes, obtenemos la solución para cada frecuencia.

Parámetros característicos dinámicos de la superestructura de Bloques Extraíbles

Parámetro Característico Dinámico	Unidad	"Ausencia tren"	"Presencia tren"
Rigidez	K_v	kN/mm	549
Longitud	L_v	Cm	56
Frecuencia propia	F	Hz	314
Amplificación	A	—	2,0
Aislamiento del sistema de Bloques Extraíbles (30÷100 Hz)	I	—	= 0,88
		dB	= 1,11
			= 1,2

4. SUPERESTRUCTURA MASSIVO DE LOSAS FLOTANTES

En el caso de la superestructura Massivo las prestaciones requeridas a la superestructura en términos de parámetros característicos vienen definidas por pares de valores óptimos ya que ante deformabilidades locales elevadas ($K_v \approx 70$) presentan interacciones reducidas entre los ejes del tren ($L_v \approx 130$). Además podemos diseñar el sistema para que su frecuencia de resonancia sea lo suficientemente baja que permita atenuar las vibraciones más molestas en ferrocarril.



4.1. ANÁLISIS ESTÁTICOS

Para encontrar las características del sistema de vía sobre losa, se ha realizado un modelo de cada uno de los elementos presentes en el sistema de forma que podemos analizarlos a través de programas informáticos de cálculo numérico.



□ Modelizado del bloque:

Para el cálculo de la rigidez total del sistema de conexión del carril (sistema de fijación y bloque) se ha expresado mediante una matriz de rigidez de 6 componentes: traslaciones (longitudinales [1], transversales [2] y verticales [3]) y rotaciones (longitudinales [4], transversales [5] y verticales [6]). Dicha matriz se define así:

$$\begin{bmatrix} \frac{K_p}{6} \cdot f_{i\tau} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p}{6} \cdot f_{i\tau} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [K_p^{-1} + K_b^{-1}]^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{b_s^2}{12} K_p \cdot f_{i\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_s^2}{12} K_p \cdot f_{i\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_s^2 + b_s^2}{12} K_p \cdot f_{i\tau} \end{bmatrix} \quad (18)$$

en donde K_p - rigidez de la suela del carril; K_b - rigidez de la suela bajo bloque y las f representan los factores de endurecimiento de las suelas para dirección normal y tangencial. "a" y "b" representan las dimensiones de la suela bajo carril.

□ Modelizado de la losa:

De forma análoga a lo efectuado para el órgano de unión y del bloque, la rigidez total del sistema se ha expresado a través de una matriz de rigidez de 6 componentes (traslaciones longitudinales [1], transversales [2] y verticales [3] y rotaciones longitudinales [4], transversales [5] y verticales [6]) así definida:

$$\begin{bmatrix} \frac{K_v}{5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_v}{5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_v}{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{b_{sv}^2}{12} K_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_{sv}^2}{12} K_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_{sv}^2 + b_{sv}^2}{12} K_v \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde K_v es la rigidez de los elastómeros bajo losa ; “a” y “b” dimensiones de la losa.

Como aclaración particular al sistema de matrices construido, diremos que los factores 1/6 (para las suelas bajo carril) y 1/5 (para las suelas bajo losa) expresan empíricamente la relación entre el módulo elástico tangencial G y el normal E del material elastomérico con que se han confeccionado los componentes. Los factores $a^2/12$ y $b^2/12$ representan la relación entre el momento de inercia flexional de la superficie del componente elastomérico afectado por las cargas y el área del mismo.

□ Modelizado del carril:

El carril en este caso actúa de viga continua, y para ello se ha modelizado su comportamiento como una matriz de 12x12 (que no representamos por su extensión), de forma que dividimos cada tramo de carril sobre la losa en una viga, en cuyos nudos derecho e izquierdo se han escrito las ecuaciones para su desplazamiento longitudinal, transversal vertical y sus correspondientes rotaciones. (6 incógnitas x 2 nudos=12).

Por último diremos que la losa ha sido modelizada como un sólido rígido, pero con posibilidad de desplazamientos y giros en todos sus ejes.

Introducidas todas las matrices y relaciones en el programa “MathCad”, encontramos finalmente todos los desplazamientos. Podemos aproximar dichos puntos a la función de Winkler para hallar de este modo los valores característicos, que son:

Rigidez $K_v=69,8\text{kN/mm}$; Longitud $L_v=124\text{mm}$



4.2. ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico del modelo se ha realizado de idéntico modo al estático, variándose los valores las rigideces estáticas por las dinámicas. Por otro lado se incluyen también las atenuaciones viscosa e histórica de los elastómeros, al trabajar estos dinámicamente.



Las funciones espectrales del sistema $H_{at}(\omega)$ e $T_{at}(\omega)$ han sido valoradas con las fórmulas que incluyen estos factores de pérdida:

$$H_{at}(\omega) = \frac{1}{K_{track} - \omega^2 \cdot M_{track} + j \cdot B_{track[i]} + j \cdot \omega \cdot B_{track[v]}} \quad (20)$$

$$T_{at}(\omega) = \frac{K_{track} + j \cdot B_{track[i]} + j \cdot \omega \cdot B_{track[v]}}{K_{track} - \omega^2 \cdot M_{track} + j \cdot B_{track[i]} + j \cdot \omega \cdot B_{track[v]}} \quad (21)$$

Finalmente, los valores que obtenemos son:

Propiedad		Unidad	“ausencia de tren”	“presencia de tren”
Rigidez	K_v	kN/mm	144,1	
Longitud	L_v	cm	101	
Frecuencia propia	f	Hz	21,1	18,7
Amplificación	A	—	3,7	3,7
Aislam. del sistema	I	—	0,24	0,18
		dB	-12,3	-14,9
Aislam. del sistema	I	—	0,33	0,23
		dB	-9,7	-12,8

Es decir que conseguimos un frecuencia de corte $\sqrt{2}18,7 = 26,5$ Hz, con lo cual la gama particularmente molesta de 30-80Hz es efectivamente atenuada.

5. CONCLUSIONES

El estudio teórico de la vía hormigonada se basa en las hipótesis clásicas de análisis, pero se amplía al introducirse en ella al comportamiento de los elastómeros que la componen. Respecto a su complejidad, resultan de gran ayuda los sistemas de resolución por ordenador.

En cuanto a las vibraciones, es muy difícil determinar en que grado se ven afectado el entorno al depender la transmisión de gran numero de variables. Por ello, la forma de evaluación empleada pasa por buscar sus curvas de comportamiento en función de la frecuencia: Curvas de respuesta de desplazamientos del carril en función de la carga y curvas del nivel de esfuerzos transmitidos al suelo.

De los dos sistemas analizados, el de losas ofrece un comportamiento inmejorable, atenuando eficazmente las frecuencias de la gama más perniciosa. El de bloques pese a ser más sencillo, ofrece un comportamiento mejor que el balasto gracias a las suelas disipativas bajo bloque.

