

**AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRAFICO FERROVIARIO
 MEDIANTE ELEMENTOS AMORTIGUADORES EN LA VIA .**

J.Mateo () ; C.Huerta (**); E.Alarcón (**)*

() E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid*

*(**) E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid.*

RESUMEN:

La interposición de elementos elásticos en la vía se revela como un procedimiento altamente eficaz en la reducción del nivel de vibraciones producidas en las edificaciones próximas a ferrocarriles trazados en zona urbana.

Al tratarse de vibraciones del suelo de pequeña amplitud, la naturaleza lineal del problema permite razonar que una disminución de los niveles de vibración en la plataforma se traduce en la misma reducción en la base de las edificaciones. La filosofía de cálculo es, por tanto, la construcción de un modelo detallado del foco, que incluya las diferentes partes de la vía, y el estudio de la variación de la respuesta en la plataforma como consecuencia de la interposición de elementos amortiguadores.

Se analiza la eficacia de: almohadillas colocadas bajo el carril ("pads"), suelas bajo traviesa, y alfombra bajo balasto, actuando conjunta o separadamente, así como de las llamadas "losas flotantes" de hormigón. Se estudia igualmente la existencia de limitaciones al uso de estos medios impuestas por las limitaciones de flecha estática. Como conclusión, cada solución presenta mayor eficacia en un rango de frecuencias determinado.

1. PRESENTACION DEL PROBLEMA.

En las últimas décadas las compañías de ferrocarriles vienen recibiendo cada vez con más frecuencia reclamaciones acerca de las vibraciones procedentes de líneas subterráneas en zona urbana. Aunque en lo referente a molestias ocasionadas existe una componente subjetiva, lo cierto es que la vibración en un edificio puede resultar perceptible como efecto puramente mecánico o como radiación acústica procedente de los forjados y tabiques. El interés despertado por el tema ha hecho que distintos países hayan desarrollado una normativa técnica limitando el nivel de vibración en locales habitados por el hombre; por otra parte, también se establecen limitaciones en los puntos de ubicación de instrumental de precisión y de diverso material electrónico.

En España, la Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario, del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA), ha realizado un esfuerzo considerable para la comprensión de esta clase de fenómenos y estudio de las soluciones aplicables al problema.

Los métodos de reducción de los niveles de vibración en el receptor consisten básicamente en:

- Reducción del nivel de vibración en el vehículo, la vía y la plataforma.
- Interposición de obstáculos entre las fuentes generadora y receptora.
- Instalación de amortiguadores en la base del edificio o de la sustentación del instrumental.

En otro artículo, presentado en este mismo Congreso, se aborda la solución de un caso práctico

mediante la interposición de obstáculos entre la fuente generadora y el receptor, lo que requiere un modelo global para estudiar la propagación de ondas desde el foco, donde no se precisa un gran detalle en el modelo. De esta forma es posible observar las distorsiones provocadas por la introducción de elementos como las trincheras o pantallas.

Como solución alternativa, se analizan aquí las reducciones en los niveles de vibración que se consiguen al introducir flexibilidades locales en la estructura de la vía, lo que, por el contrario, hace que ahora el detalle se precise en el foco. En efecto, al tratarse de vibraciones del suelo de pequeña amplitud, la naturaleza lineal del problema permite razonar que una disminución de los niveles de vibración en la plataforma se traduce en la misma reducción en el receptor.

La filosofía de cálculo es, por tanto, la construcción de un modelo detallado del foco, que incluya las diferentes partes de la vía y el estudio de la variación de la respuesta en la plataforma como consecuencia de la interposición del elemento amortiguador. La efectividad se puede medir por el cociente a cada frecuencia o por su expresión en decibelios (dB).

2. POSIBLES SOLUCIONES

Dentro de la filosofía del control de vibración en el foco, existen diversas alternativas que pueden aplicarse simultáneamente o por separado para aminorar la intensidad de las ondas emitidas al terreno (J. Mateo, 1994).

Para ello es fundamental la actuación sobre el vehículo y sobre el estado de la superficie del carril. Sobre este último aspecto, el amolado es el procedimiento básico de prevención; su objetivo es doble: por una parte permite regenerar periódicamente la superficie de rodadura y reducir el ruido de fondo, y por otro sirve para suprimir los efectos locales del desgaste ondulatorio. La mejora relativa depende de las condiciones iniciales del carril, pero, en cualquier caso, la homogeneización de la superficie permite mejoras del orden de 3 a 4 dB y la supresión del desgaste ondulatorio puede significar una bajada de hasta 10 dB.

Otras posibles actuaciones se basan en la mejora de las condiciones de la plataforma. La respuesta dinámica depende tanto de la rigidez de la plataforma como de la masa que interviene en la transmisión de la vibración. En este sentido, la sustitución del balasto existente cuando éste se encuentra contaminado hasta el punto de anular la flexibilidad del sistema, se revela como una medida deseable. En cualquier caso si se quiere mantener la capacidad amortiguadora del balasto es preciso proceder a su mantenimiento de forma regular. Un aumento en el espesor de balasto cumple el objetivo en cuanto a masa y en cuanto a rigidez.

La influencia reductora de la interposición de elementos flexibles en la estructura clásica de la vía se comprende bien si se estudia la respuesta de un sistema de un grado de libertad con frecuencia propia ω cuando se somete a una carga oscilante del tipo $F e^{i\alpha t}$. En la figura 1, $\tau = \alpha/\omega$ es el cociente entre la respuesta de la deflexión dinámica r y la estática δ_{st} , y ρ es el índice de amortiguamiento. Como puede verse, para valores de ρ inferiores al 10%, la respuesta se amplifica en las proximidades de $\tau=1$ (resonancia), pero se reduce conforme aumenta τ .

Si la carga actuante $f(t)$ se descompone en sus componentes de Fourier $F(\alpha)$:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha) e^{i\alpha t} d\alpha$$

cada componente $F(\alpha)$ se verá reducida siempre que, aproximadamente, $\alpha \geq 1,5$. Es decir, disminuyendo la

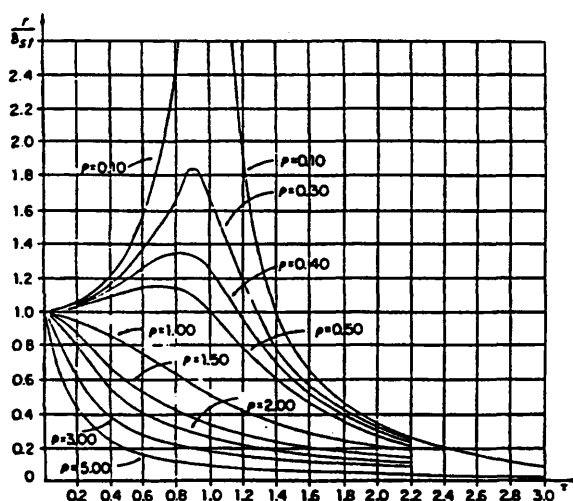


Figura 1

frecuencia propia del sistema es posible rebajar los componentes de frecuencia superior. Por ejemplo, si se desea reducir las frecuencias superiores a $\alpha=30\text{Hz}$, la frecuencia propia del sistema debe estar alrededor de $\omega = 30/1,5 = 20\text{ Hz}$. Para conseguir reducir la frecuencia basta reducir la rigidez k del sistema, o bien aumentar la masa m (recuérdese que $\omega^2 = k/m$). Surgen así los sistemas de interposición de elementos elásticos (alfombras, suelas, etc) para flexibilizar a través de k o la adición de masa (losa flotante) para flexibilizar a través de m .

Este requisito de flexibilización tiene, sin embargo, una cota ya que, por condiciones de servicio, la vía clásica admite flechas limitadas. En condiciones estáticas, por ejemplo, la flecha bajo un eje no debe superar los 4 mm. Esta limitación marca justamente la aplicabilidad práctica de los sistemas que se estudian a continuación.

Es interesante también observar en la figura 1, que para valores muy altos de ω no se produce ninguna respuesta. Ello permite desacoplar el estudio de la masa suspendida del vehículo cuya frecuencia propia (del orden de 2 Hz) conduciría, al ser comparada con valores α del orden de 30, a valores muy altos de τ .

Uniones elásticas carril-traviesa.- Se han propuesto diferentes alternativas para actuar desde el propio carril. En algunas obras de fábrica o en vías sobre placa de reciente construcción (estación de cercanías de Atocha, por ejemplo) se ha recurrido al vertido de una resina que se amolda a los huecos del carril, envolviendo el patín y parte del alma. Entre otras posibilidades se puede citar el recurso de placas elásticas situadas bajo la placa de carril o a sujeciones especiales que intercala una suela acanalada entre carril y la placa de asiento y otra microcelular entre placa de asiento y traviesa.

Suelas bajo traviesa.- Con objeto de no alterar la disposición de las sujeciones en el sistema tradicional, a veces se recurre a interponer suelas bajo la traviesa. Una de las primeras aplicaciones de este método se realizó en el Metro de Barcelona en 1978 y así figura en todas las obras técnicas como un intento pionero de amortiguamiento por este procedimiento. El procedimiento consiste en esencia en retirar el balasto en huecos alternativos y con ello intercalar dos placas de material elastomérico centradas respecto al carril y debajo de cada traviesa. Estas placas se fijan por medio de un adhesivo y están forradas por una capa de elastómero más duro que actúa como protección frente al ataque del balasto.

Alfombras bajo balasto.- Otro procedimiento clásico es el tendido de una alfombra elástica bajo el balasto. El material de las alfombras puede ser granulado (construido a partir, por ejemplo, de neumáticos usados), espumas de poliuretano o multicapas, a las que se puede incluso añadir una hoja metálica.

Bandejas aislantes.- La introducción de una placa de hormigón sobre apoyo elástico en el esquema de la infraestructura permite aumentar la masa y disminuir la rigidez global, extremos que, como se ha indicado en los apartados anteriores, son definitivos a la hora de establecer una mejora de la situación.

3. DESCRIPCION DEL MODELO.

En el modelo de cálculo el vehículo intervendrá a través de la masa no suspendida (porción de masa del bogie que no está aislada del carril mediante un sistema de suspensión; incluye ruedas, ejes y, cuando no dispongan de suspensión propia, los motores de tracción y el tren de engranajes de transmisión), que se incorporará a la masa del armamento (carril, sujecciones, traviesas, etc). En la modelización de los distintos elementos de la plataforma se considera la parte activa de los mismos; es decir, la que se moviliza bajo la acción de un eje del material móvil situado sobre el eje de la traviesa.

El cálculo se basa en la comparación de la respuesta de los modelos representativos de las diferentes alternativas con una situación de referencia.

En ciertos modelos tratados por otros autores (por ejemplo: Chua, *et al.* 1992), la acción del tren se modela como un tren de cargas actuando sobre un carril infinito sobre fundación elástica. En el caso aquí estudiado, y al objeto de simplificar el modelo, se ha considerado que la distancia entre bogies es suficiente como para considerar que existe desacoplamiento en la acción de los dos ejes. El reparto de cargas en profundidad se ha supuesto a 45°. El posible error cometido al hacer estos supuestos afectará de forma similar a los casos con y sin elemento aislante, por lo que su repercusión será escasa en el cociente de las respuestas de ambos. En el modelo se establece así una carga puntual. El muelle k_1 y el amortiguador c_1 (figura 2) representan en el modelo el efecto de reparto del elemento vía sobre las traviesas contiguas a la modelizada.

La rigidez k_1 es

$$k_1 = k - \rho_{eq}$$

donde:

k = rigidez global obtenida mediante la formula de Zimmermann-Timoshenko (J.Alfás y A.Valdés, 1990), aplicable a carga puntual actuando en vía infinita sobre apoyo elástico

Con objeto de realizar un solo modelo útil para todas las alternativas analizadas se ha preparado un modelo genérico con cinco grados de libertad (figura 2) en que se suprimen los no necesarios dando valores muy altos a las rigideces que no interesen. Si se anula la sujección elástica y la suela se tendría la situación de referencia. La notación empleada es la siguiente:

K_1, C_1	Muelle y amortiguador representativos del efecto de reparto del carril sobre las traviesas contiguas a la modelizada.
$\rho_{goma}; C_{goma}$	Muelle y amortiguador representativos de la sujección elástica carril-traviesa.
$\rho_{trav}; C_{trav}$	Muelle y amortiguador representativos de la traviesa.
$\rho_{bal}; C_{bal}$	Muelle y amortiguador representativos de la capa de balasto.
$\rho_{plat}; C_{plat}$	Muelle y amortiguador representativos de la plataforma.
$\rho_{alf}; C_{alf}$	Muelle y amortiguador representativos de la alfombra bajo balasto.
$\rho_{neop}; C_{neop}$	Muelle y amortiguador representativos de los neoprenos de apoyo de la losa.
M_{ns}	Masa no suspendida del eje del vehículo.
M_c	Masa carril y sujecciones.

- M_t : Masa de la traviesa.
- M_{bal}^* : Masa total de la capa de balasto.
- M_{bal} : Masa de balasto vibrando con la traviesa.
- M_{plat}^* : Masa activa de la plataforma.
- M_{losa} : Masa de la losa.

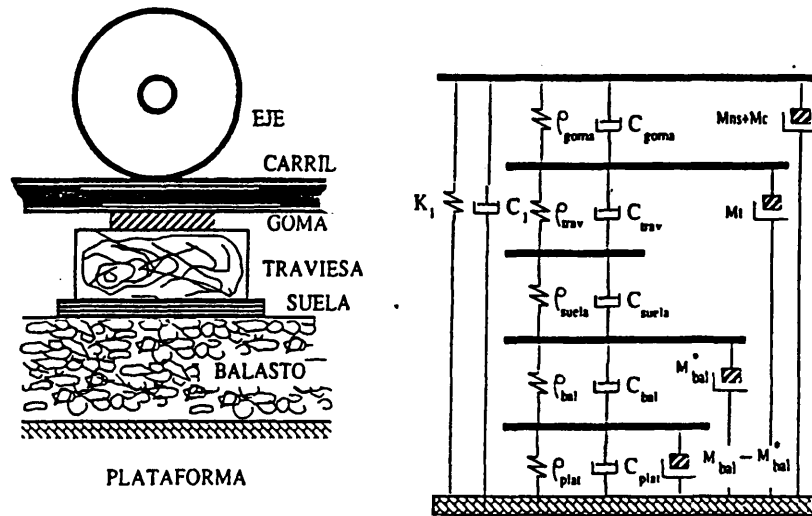


Figura 2

Las rigideces de balasto (ρ_{bal}) y plataforma (ρ_{plat}) se han determinado como los cocientes entre la carga y el desplazamiento en la superficie del balasto, y en la interfase balasto-plataforma. Se calculan los desplazamientos producidos bajo una zapata rectangular representativa del área efectiva de contacto traviesa-balasto.

La rigidez de la sujección elástica (ρ_{goma}) y de las suelas aislantes (ρ_{suela}) de la traviesa (ρ_{trav}) de la alfombra bajo balasto (ρ_{alb}) se han determinado con arreglo a las dimensiones y parámetros característicos de estos elementos.

A efectos de cálculo, la masa de balasto se distribuye en una parte que vibra con la plataforma y otra que lo hace con la traviesa. Esta última se obtiene mediante el método de Rayleigh (M.A.Hacar y E. Alarcón, 1971):

$$m_{eq} = \int_0^L m(z) \Psi(z)^2 dz$$

donde $m(z)$ es la masa por unidad de longitud a la profundidad z y $\Psi(z)$ el asiento relativo a esa profundidad. Para calcular $\Psi(z)$ se asimila cada una de las dos zonas de contacto de la traviesa a un área circular equivalente de radio r_0 y se admite una distribución a 45° .

Para determinar la masa efectiva de la plataforma se utiliza la fórmula de Withman (R.V. Withman, 1977) para un semiespacio.

$$M_{plat} = \frac{2\xi}{1-\nu} m_{plat}$$

donde ν es el coeficiente de Poisson del semiespacio, ξ un parámetro función de ν y m_{plat} la masa de una semiesfera con sección máxima equivalente a la zona de reparto de la presión proveniente de la traviesa.

En el caso de losa flotante se supone el carril apoyado sobre una banda elástica, y ésta sobre una losa de hormigón de 4,50x2,50x0,30 m. Esta losa se encuentra a su vez suspendida sobre dos bandas elásticas de 1 m. de anchura cada una de ellas.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Los modelos de cálculo han sido estudiados mediante un programa de ordenador (ONDINA) capaz de obtener los desplazamientos ante carga unidad para cada frecuencia de excitación. Ello permite comparar los desplazamientos (y por tanto las aceleraciones) de la plataforma en la situación de referencia con los correspondientes a las diferentes alternativas. La figura 3 muestra los resultados obtenidos para los casos más significativos

Como puede verse, la interposición de una sujeción elástica entre carril y traviesa solo es efectiva a partir de una frecuencia de 53 Hz. La colocación de material elástico bajo las traviesas hace factible el amortiguamiento en una mayor banda de frecuencias, con un límite inferior de 27 Hz. La alfombra de material elástico bajo el balasto proporciona reducciones con un límite inferior 28 Hz. Con la solución de losa flotante se consigue que la frecuencia de corte de la reducción baje hasta los 22 Hz.

5. CONCLUSIONES.

Del estudio realizado cabe concluir:

- 1: Las capas elásticas bajo carril son ineficaces para frecuencias inferiores a 50 Hz por lo que su uso debe ir acompañado por otra solución complementaria.
- 2: La suela bajo traviesa tiene un rendimiento adecuado y no presenta problemas de mantenimiento.
- 3: La alfombra bajo balasto presenta igualmente interesantes resultados mecánicos. Su mantenimiento es más problemático y, al parecer, provoca un cierto aflojamiento del balasto.
- 4: La losa flotante es la solución más efectiva desde el punto de vista mecánico. Su coste en una situación de servicio es elevado.
- 5: Ningún sistema es capaz de eliminar las vibraciones de frecuencias inferiores aproximadamente a los 20 Hz, que según la experimentación realizada aparecen en algunas edificaciones cuando circulan ciertas unidades con mal estado de conservación.

En este sentido cabe indicar que la solución de aislamiento debe ir acompañada por un mantenimiento sistemático del material.

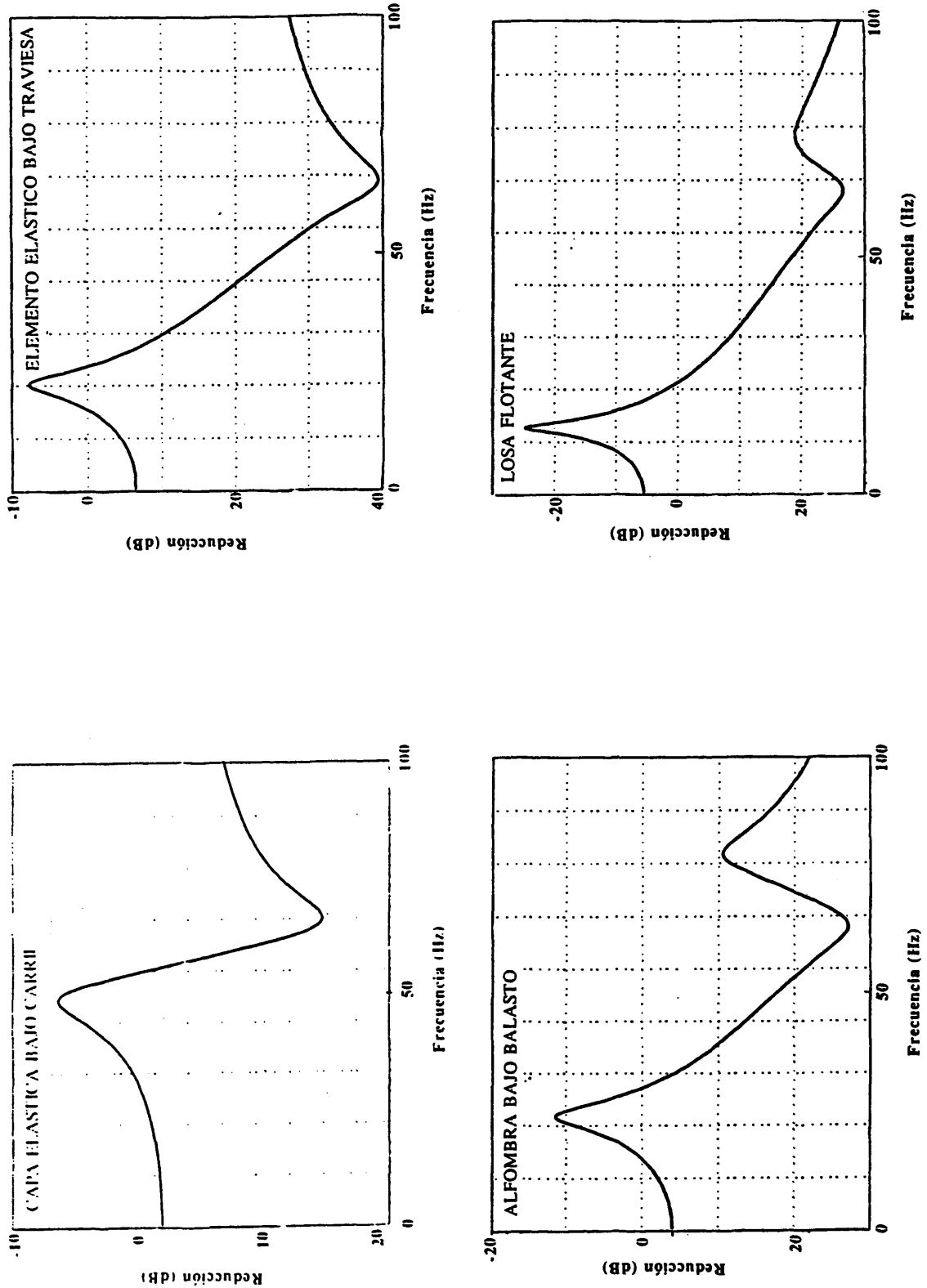


Figura 3

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren manifestar aquí su especial agradecimiento a D.Julián Santos y a D.Ignacio Alonso, de la Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario, del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA) por su continua motivación y estímulo, así como a la Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación (SINEX S.A.) por los medios facilitados.

REFERENCIAS

Alías,J.; Valdés,A. (1990) *"LA VIA DEL FERROCARRIL"*. Ed. Bellisco.

Chua,K.H.; Balendra,T.; Lo,K.W. (1992) *"GRONDBORNE VIBRATIONS DUE TO TRAINS IN TUNNELS"*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 21/1992.

Hacar,M.A.; Alarcón,E. (1971) *"ELEMENTOS DE DINAMICA APLICADA A LAS ESTRUCTURAS"*. EDIX

Mateo,J. (1994) *"AISLAMIENTO DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRAFICO FERROVIARIO"*. Tesis Doctoral, E.T.S. de Ingenieros Industriales de la U.P. de Madrid.

Withman,R.V. (1977). Apuntes M.I.T. no publicados.