

VIBRACIONES TRANSMITIDAS POR EL TRÁFICO FERROVIARIO UNA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS AL PROYECTO

E. Alarcón^{*}, L. Hermanns[†], A. Fraile[†]

^{*} Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales
Universidad Politécnica de Madrid
c/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid
e-mail: alarcon@estru.upm.es

[†] Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM)
c/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid
e-mail: afraile@etsii.upm.es

Palabras clave: Vibraciones, Ferrocarriles, Métodos Numéricos, Aislamiento

Resumen: *El creciente número de soterramiento de vías de ferrocarril en ciudades y la consiguiente liberación de terrenos utilizables para edificios de habitación ha conducido al incremento de quejas por las vibraciones transmitidas por el tráfico ferroviario. En este artículo se comparan los resultados obtenidos mediante el uso de diferentes medidas correctoras simuladas numéricamente y se describen brevemente las mejoras conseguidas con la solución que se está construyendo en algunos lugares.*

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los primeros tiempos del ferrocarril se le reservaron emplazamientos en las ciudades alrededor de los cuales se desarrollaron zonas industriales que posteriormente se han ido transformando en terrenos dedicados a viviendas con lo que las exigencias de confort se han incrementado.

Para cumplir con ellas y liberar terreno que pueda ser comercializado se ha procedido a soterrar las líneas en túneles desde las que, sin embargo, se generan vibraciones al paso de los trenes que llegan (figura 1) a los edificios vecinos.

Si no se toman medidas adecuadas de aislamiento éstas vibraciones pueden alcanzar niveles inaceptables para el vecindario lo que da origen a problemas continuos con los Ayuntamientos, Administraciones ferroviarias, etc.

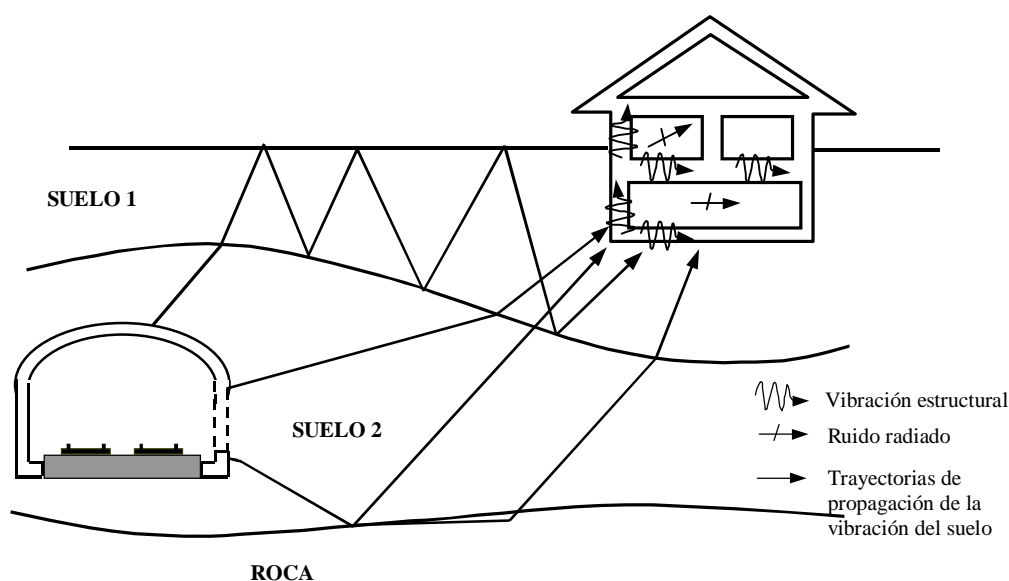


Figura 1: Transmisión de vibraciones a las edificaciones próximas al ferrocarril

No existe un consenso general sobre los niveles admisibles de vibraciones aunque se considera que los requisitos establecidos en la Norma ISO 2631-2 representan el estado del conocimiento^{1,2}. En ella se establecen, entre otros, los límites de aceleración verticales aceptables en diferentes tipos de construcciones. Por ejemplo, las líneas de la figura 2 representan los límites establecidos para viviendas y hospitales.

En la misma figura se han incluido los resultados de medidas tomadas en un edificio de una ciudad española, en que se observan las bandas de frecuencias más agresiva así como la existencia de trenes que superan ampliamente los límites citados más arriba. Respecto al primer aspecto conviene observar que los problemas quedan generalmente confinados al intervalo comprendido entre los 20 y los 100 Hz ya que para frecuencias superiores, los límites admisibles crecen. Ello es del mayor interés para establecer los modelos numéricos tal como se indicará más adelante.

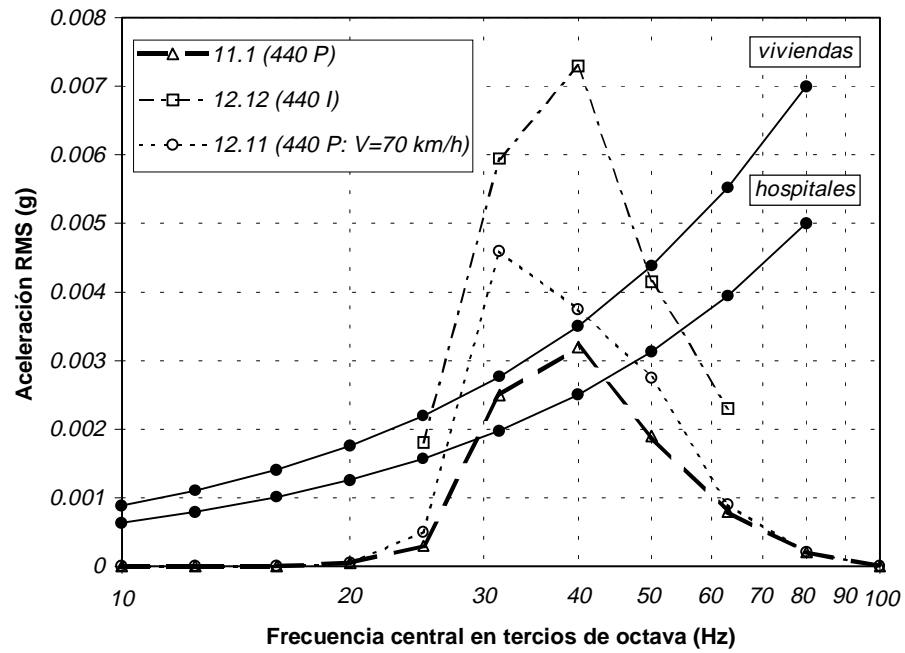


Figura 2: Efectos medidos y límites admisibles

La metodología que se ha utilizado en los diferentes casos estudiados tiene como primera fase (además del correspondiente estudio del terreno, tipo de construcción afectada, etc) la toma de medidas en diferentes secciones transversales y en diferentes niveles (carril, traviesa, plataforma, hastiales, aceras, edificios, etc) (figura 3). A continuación se utiliza un estudio mediante modelos numéricos para mejorar la estimación inicial de las propiedades del terreno y fijar las dimensiones de la solución de aislamiento adoptada. Finalmente se procede a una nueva toma de datos que permite establecer los niveles de reducción conseguidos respecto a la situación inicial.

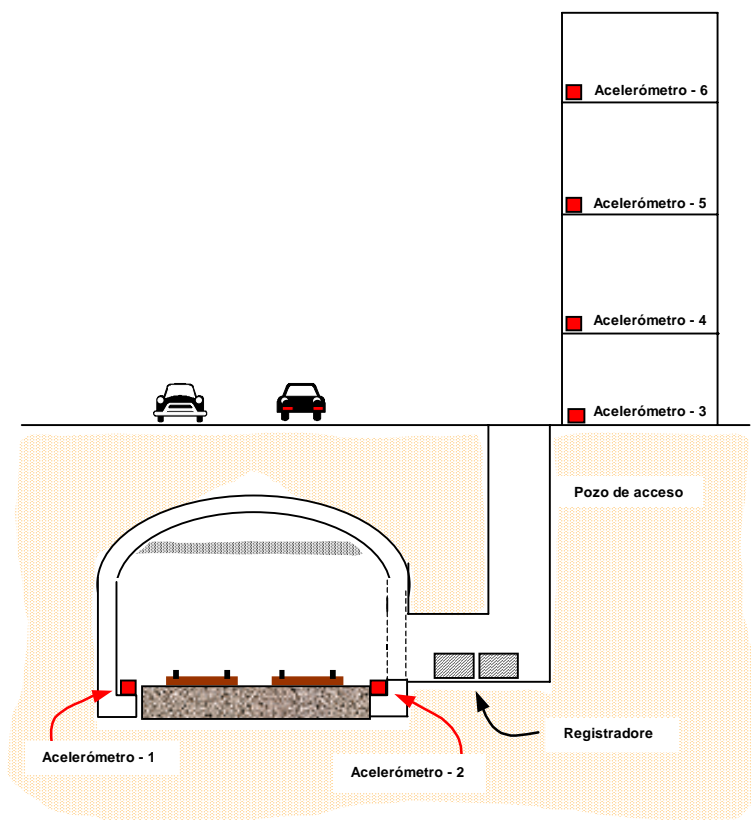


Figura 3: Sección tipo con puntos de medida

2. MEDIDAS CORRECTORAS

Las medidas correctoras pueden aplicarse en el foco de vibración, en la trayectoria de transmisión o en el propio receptor (edificio).

Limitándose al caso de las vibraciones verticales puede decirse que el origen se encuentra en el paso de las cargas a diferentes velocidades y a la interacción vehículo-vía provocada por las irregularidades en la rueda o en el carril. El primer efecto está bien estudiado³ y produce desplazamientos como los indicados en la figura 4 que generalmente solo influyen en frecuencias inferiores a los 20 Hz. Para frecuencias más altas son determinantes los defectos de rueda y vía, por lo que las medidas a tomar en el foco se refieren a eliminación de planos de rueda, amolado del carril, mejoras del trazado, etc. Los resultados de la figura 2 se obtuvieron con material móvil mal conservado y bastó la sustitución de las unidades antiguas para conseguir una notable reducción de niveles.

El segundo grupo de medidas correctoras consiste en actuar en la trayectoria de transmisión intercalando elementos que filtren las frecuencias.

Es determinante la rigidez de la sujeción del carril, la interposición de elementos flexibles bajo traviesa o balasto y, en ocasiones^{4,5} se ha propuesto el uso de pantallas o trincheras que rodeen la edificación.

Finalmente se puede actuar en el edificio cambiando sus características y recurriendo a construirlo sobre muelles^{6,7}.

Esta técnica, que está experimentando un creciente desarrollo ante los desafíos planteados por la ingeniería sísmica, requiere un cuidadoso estudio en el dimensionamiento de los

aisladores ya que (figura 5) las bandas importantes (viento, sismo, tráfico) de frecuencias no se superponen y una mejora en una determinada banda puede implicar un peor comportamiento ante una acción distinta.

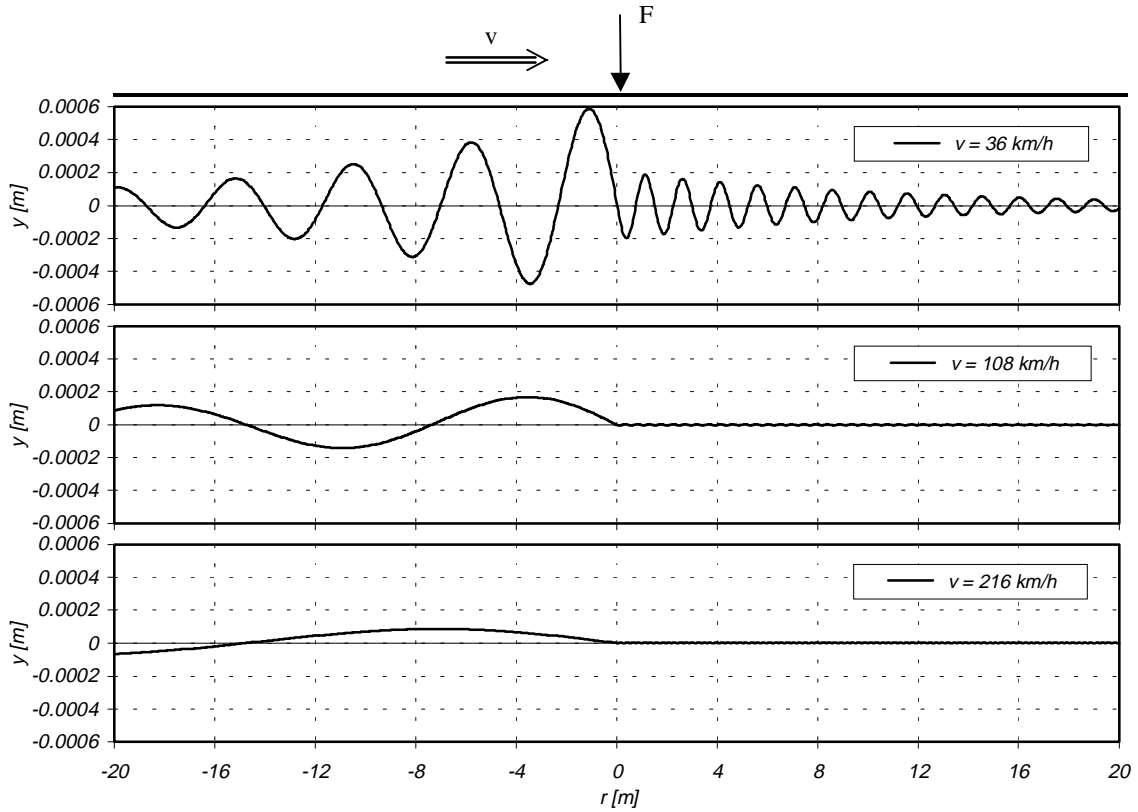


Figura 4: Desplazamientos en un sistema de coordenadas móvil con la carga

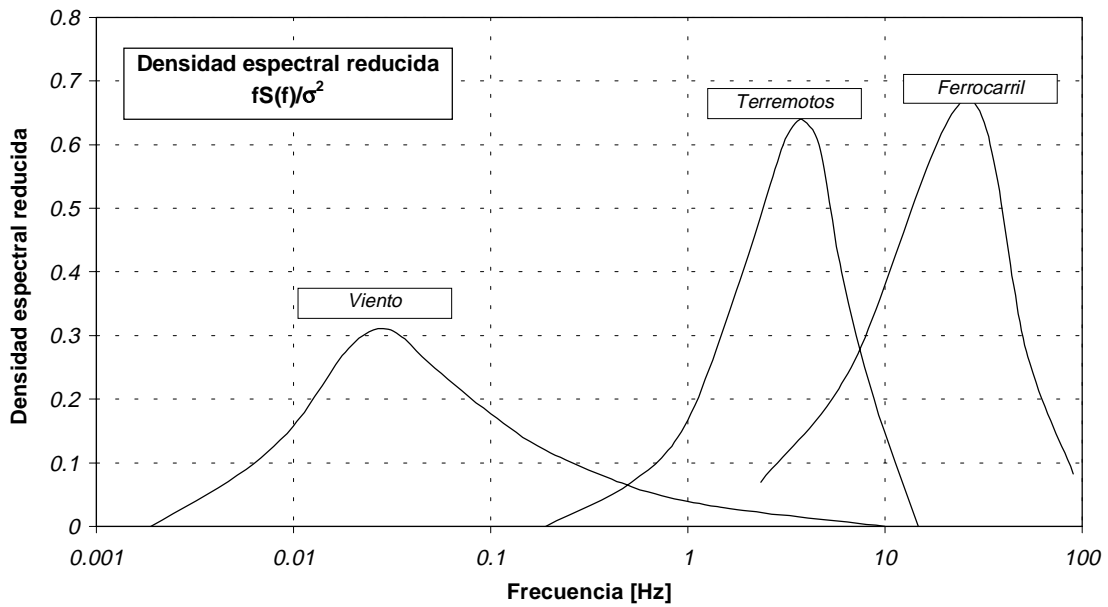


Figura 5: Densidades espectrales comparadas

3. MODELOS NUMERICOS

Como se ha indicado más arriba el grado de admisibilidad de las vibraciones se mide en el dominio de la frecuencia y, por otro lado, al incorporar al estudio el terreno es difícil establecer contornos que permitan truncar la malla de cálculo. Por ello se suele trabajar con el **método de los elementos de contorno en el dominio de la frecuencia**. Como es sabido⁸ la base del método es la colocación de una ecuación integral en una malla mediante el uso de la ecuación de Somigliana en frecuencia

$$c(P)u(P,Q) + \int_{\partial\Omega} T(P,Q)u(Q) = \int_{\partial\Omega} U(P,Q)t(Q)$$

donde P es el punto de colocación, Q el punto de integración, $c(P)$ una matriz que refleja las condiciones geométricas en el punto P, $\partial\Omega$ el contorno, t los valores del vector en tensión en el contorno, T y U núcleos debidos a la solución fundamental aplicada en el punto P.

La figura 6 representa una malla de elementos de contorno utilizado en uno de los casos estudiados. Como puede verse existen subregiones establecidas para facilitar la integración de los coeficientes de influencia, así como otras destinadas a modelar las interfases del terreno.

Generalmente^{9,10,11} se considera que es posible un estudio plano cuando la distancia del receptor a la vía es inferior a la longitud de los trenes dividida por π , lo que se cumple en la mayoría de los casos en que se presenta el problema.

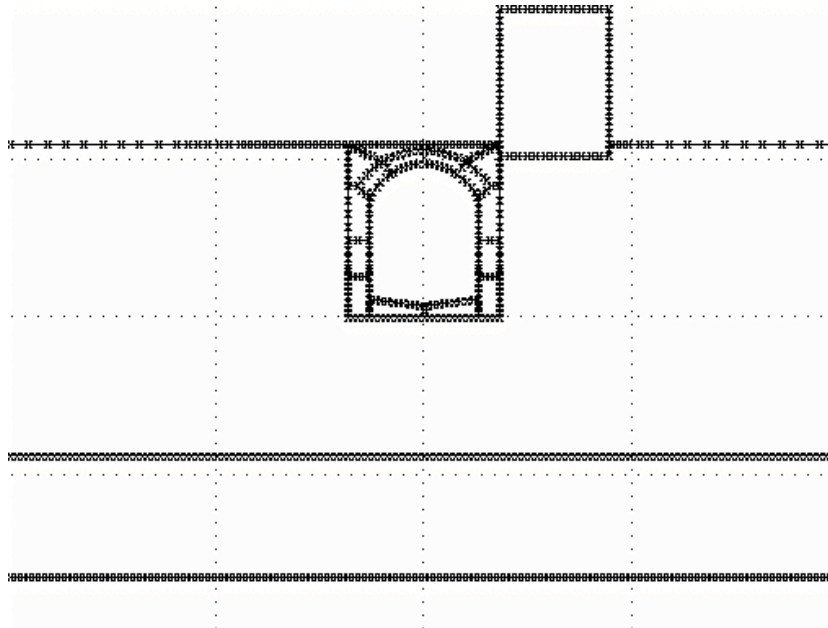


Figura 6: Malla de elementos de contorno

3.1. Ajuste de propiedades del terreno

Como se ha indicado más arriba la toma de datos se realiza en puntos representativos de las secciones características de la línea ferroviaria. En particular se dispone de resultados simultáneos correspondientes a la plataforma bajo balasto si es que no existe contrabóveda o a

ésta, así como de valores tomados en superficie o en el sótano de la edificación vecina. En consecuencia la primera utilidad del modelo numérico consiste en el ajuste de propiedades del terreno que han sido establecidos en primera aproximación mediante los estudios geotécnicos o geofísicos previos. El método conduce a resultados del tipo indicado en la figura 7 que, dentro de las imprecisiones producidas en todo el proceso de promediado, son adecuados para la mayoría de las soluciones prácticas.

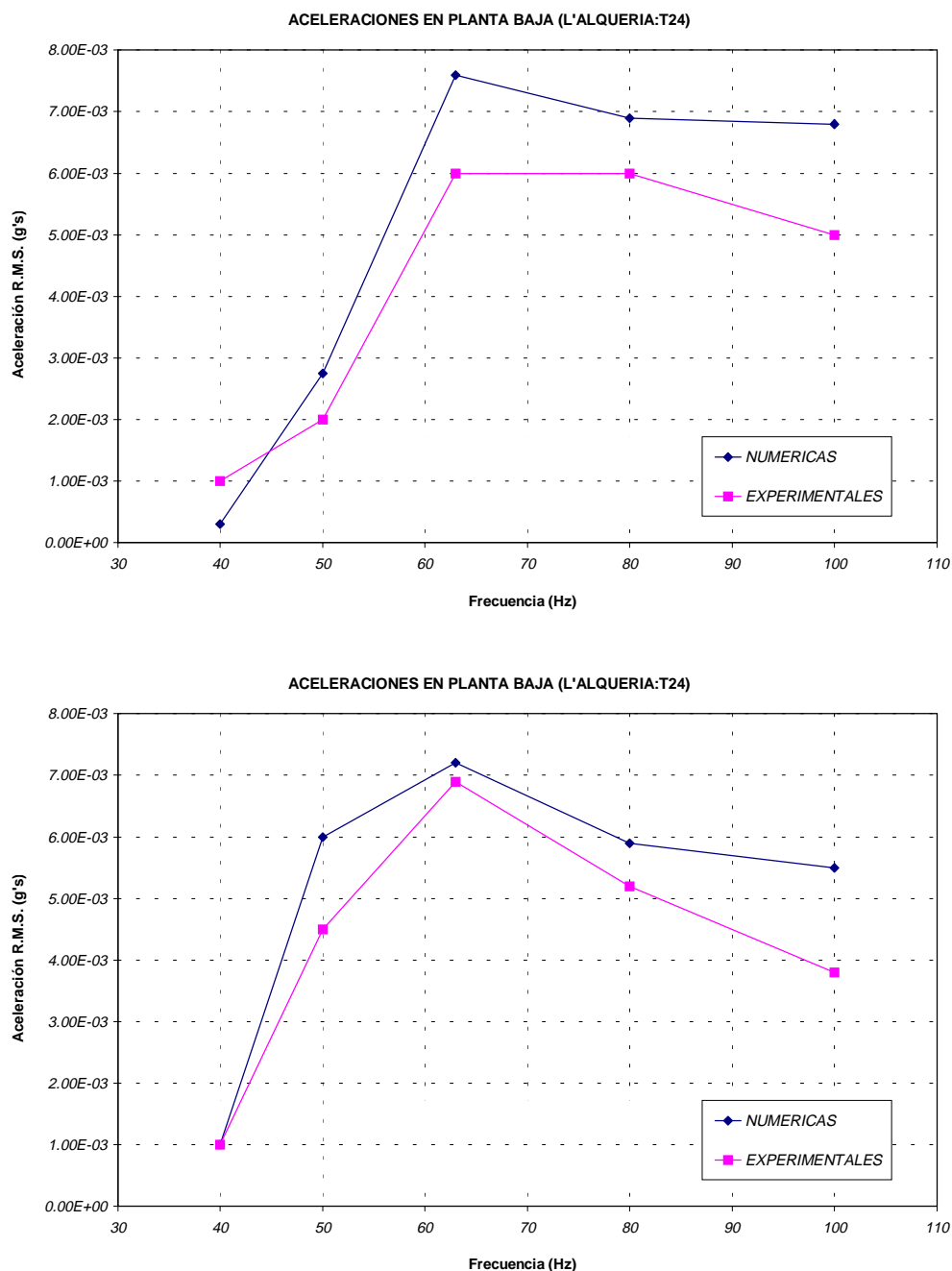


Figura 7: Resultados experimentales y ajuste del modelo

3.2. Soluciones de pantallas y trincheras

Desde las primeras propuestas de Barkan⁴ en los 60, aplicadas a cimientos de máquinas vibrantes, se ha propuesto repetidamente el uso de pantallas y trincheras para interponerse en la trayectoria de las ondas^{12, 13, 14}. Con objeto de estudiar la efectividad de la solución se llevó a cabo un estudio paramétrico en que se estudiaron diferentes condiciones de relleno de la zanja. La figura 8 representa una de las mallas que fueron estudiadas en la que puede verse, además de las subregiones correspondientes a la pantalla, el modelo de un edificio situado en las proximidades del túnel que servía para interpretar las medidas tomadas a diferentes alturas.

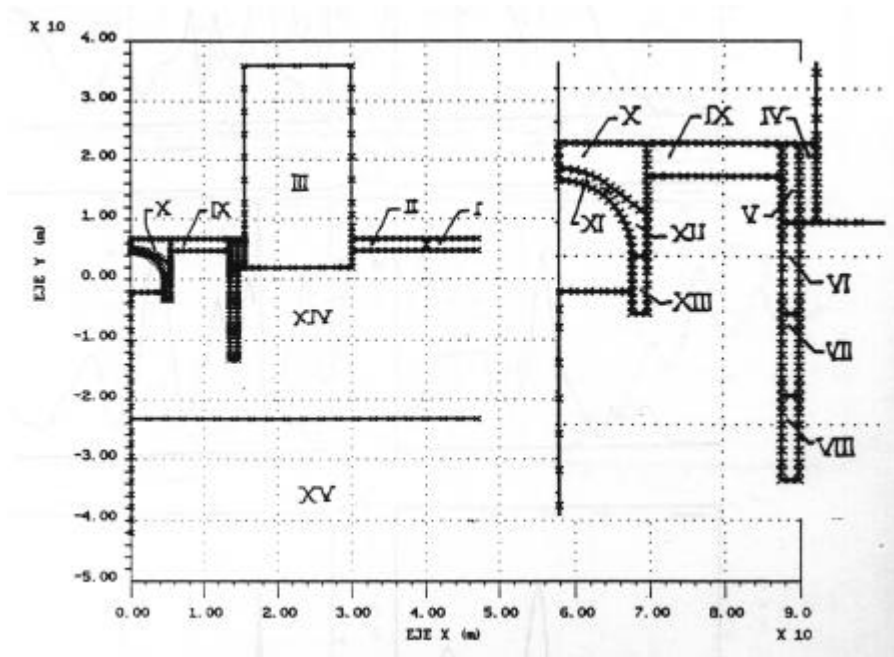


Figura 8: Malla con pantalla

La zanja se modeló con diferentes propiedades representativas de hormigón, arcilla y poliestireno expandido, así como el propio suelo respecto al que se comparaban los resultados. En la malla de la figura 9, por el contrario se establecía claramente un corte representativo de una trinchera que se llevaba a diferentes profundidades.

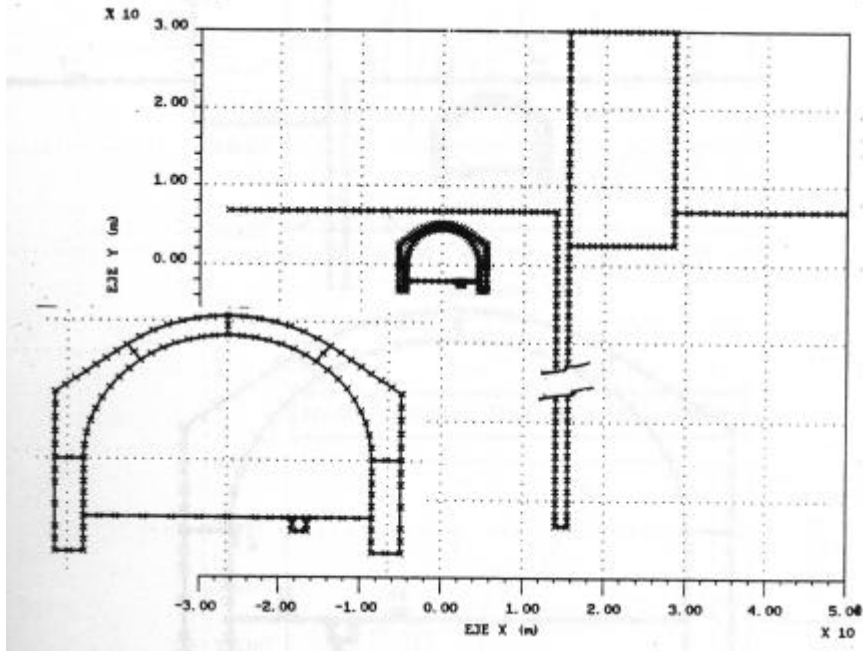


Figura 9: Malla con zanja

La posibilidad de materializar un corte en el terreno ha sido establecida en los últimos años (figura 10) mediante el desarrollo de un geotextil¹⁷ que se sumerge en una zanja rellena con bentonita-cemento, y que se infla con diferentes presiones para equilibrar los empujes hasta que se produce el fraguado.

Desgraciadamente el producto solo existe disponible hasta profundidades de unos 10 m, lo que limita su aplicabilidad.

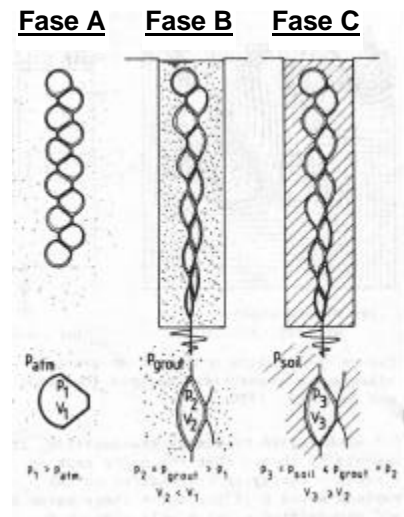
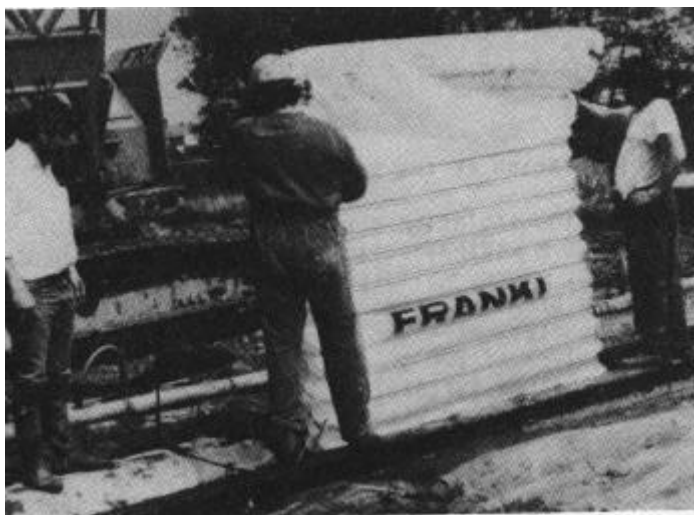


Figura 10: Sistema de construcción de una trinchera

La figura 11 recoge algunos resultados para uno de los casos estudiados en que puede verse que para el caso de pantallas no se consigue prácticamente ninguna mejora.

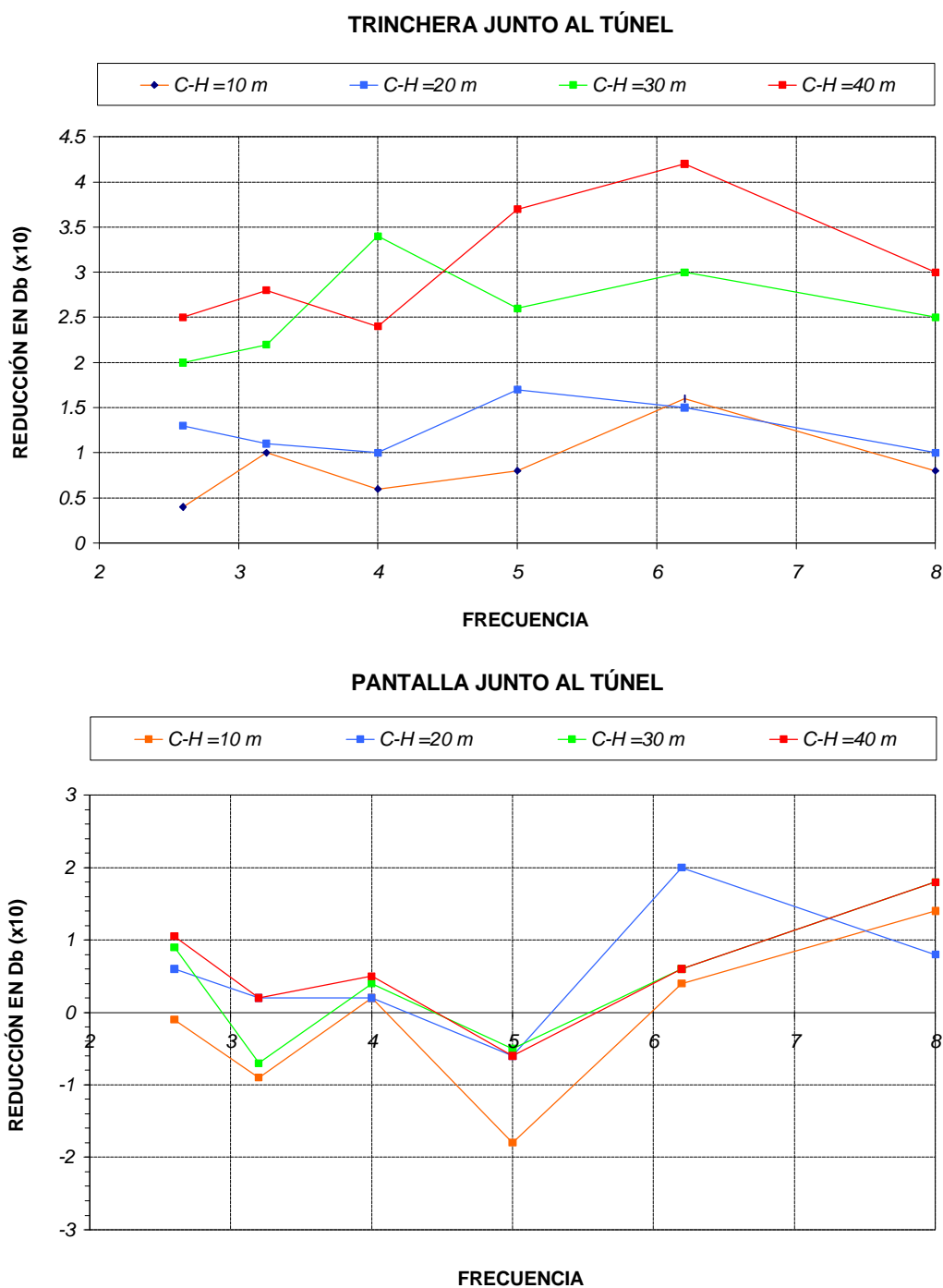


Figura 11: Reducciones obtenidas

3.3. Interposición de elementos elásticos

Como se ha dicho en el apartado 2 el cambio de flexibilidad en los alrededores del foco permite filtrar las frecuencias peligrosas y reducir con ello los niveles transmitidos.

El comportamiento local alrededor de la vía es establecido mediante modelos bien conocidos¹¹ de masas y muelles donde basta simular el vehículo mediante los valores de las

masas no suspendidas y limitar la acción a las irregularidades entre rueda y carril (figura 12). Ello es debido a que por encima de los 20 Hz el movimiento del vehículo queda desacoplado de la masa no suspendida mediante la suspensión primaria y el efecto de la velocidad de las cargas pierde peso frente a la influencia de las irregularidades.

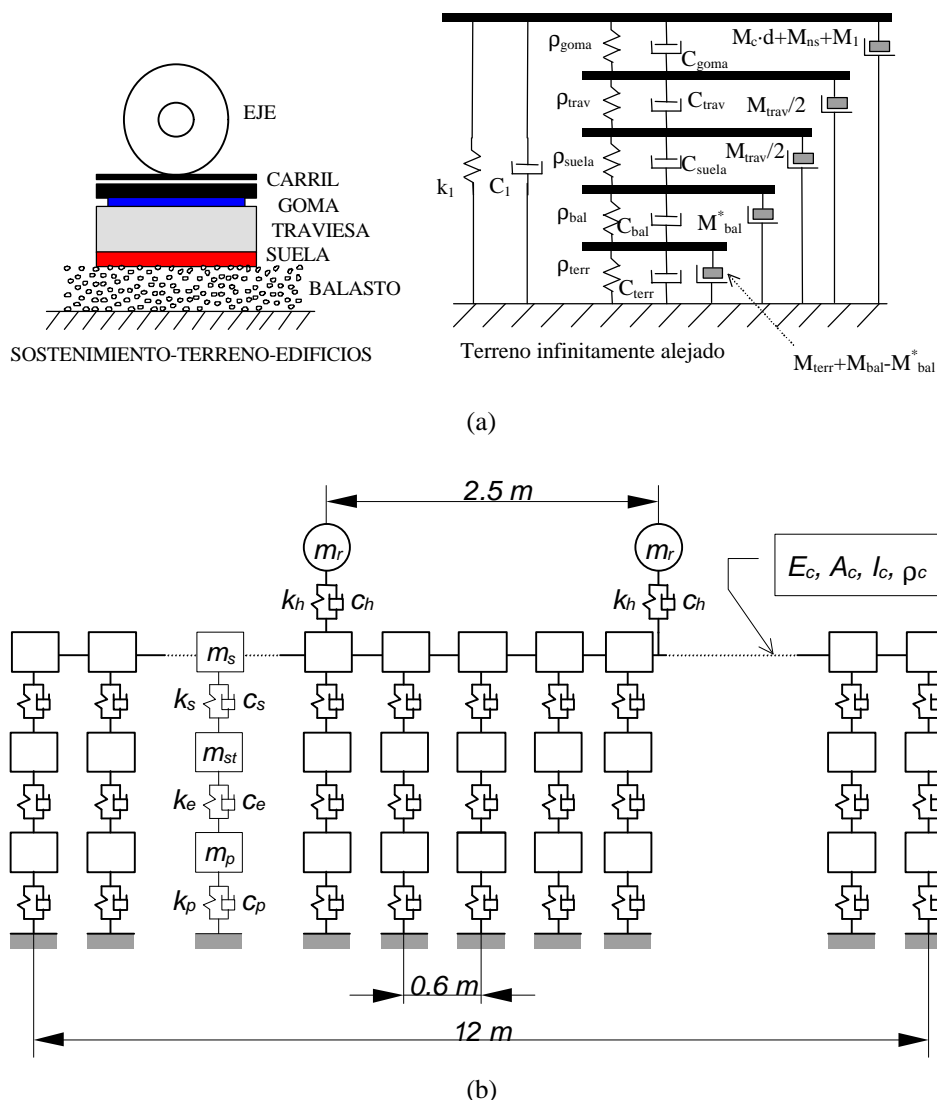


Figura 12: Modelos locales

En el modelo de la figura 12a los elementos de la torre representativa de la sujeción, la traviesa, el balasto, etc, se ven acompañados de un muelle en paralelo representativo del efecto longitudinal, mientras en la figura 12b se ha preferido plantear éste directamente.

Aun en estos casos el modelado de la sección transversal incluyendo terreno y edificios (vg.: figura 6) es de interés. En la referencia 11, por ejemplo, se pretendía obtener resultados estadísticos en diferentes puntos de un edificio. Para ello el método es obtener la densidad espectral de las acciones en la plataforma mediante un modelo local como el de la figura 12a y, a continuación, aplicar esa densidad espectral al modelo global para obtener la respuesta en diferentes puntos. Un inconveniente menor de este procedimiento es que se desprecia la flexibilidad del modelo global en comparación con la introducida a nivel local.

En los casos estudiados por nosotros se ha preferido actuar en sentido contrario. En primer lugar se ha estudiado la impedancia dinámica del modelo global. Así en el caso de la figura 6 se han obtenido los resultados de la figura 13.

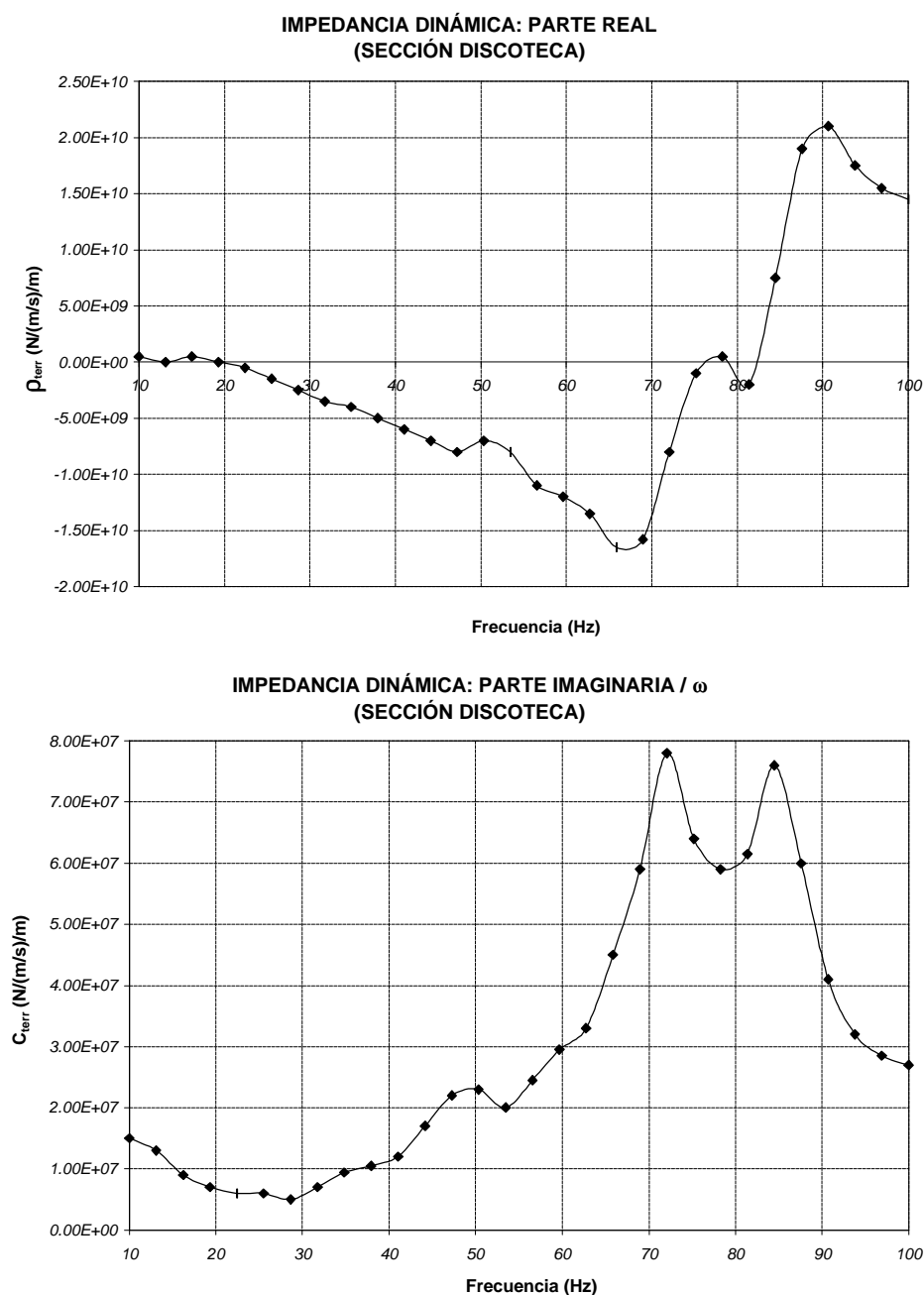


Figura 13: Impedancia dinámica de terreno y sostenimiento

Estos resultados obtenidos con la malla global son sintetizados en valores de rigidez y amortiguamiento dependientes de la frecuencia e incorporados al modelo local. En éste es muy sencillo añadir elementos distintos representativos de diferentes alternativas y proceder a su comparación. En este método es preciso conocer la banda a eliminar para proceder al dimensionamiento del elemento aislante. En la figura 14 se han recogido los resultados

obtenidos mediante la interposición de sujeciones especialmente flexibles, suelas bajo traviesa, alfombra bajo balasto y losa sobre apoyos elásticos. Los resultados se han dibujado en relación con la situación de la vía clásica sobre balasto observándose la importante disminución obtenida en la banda de frecuencias peligrosas.

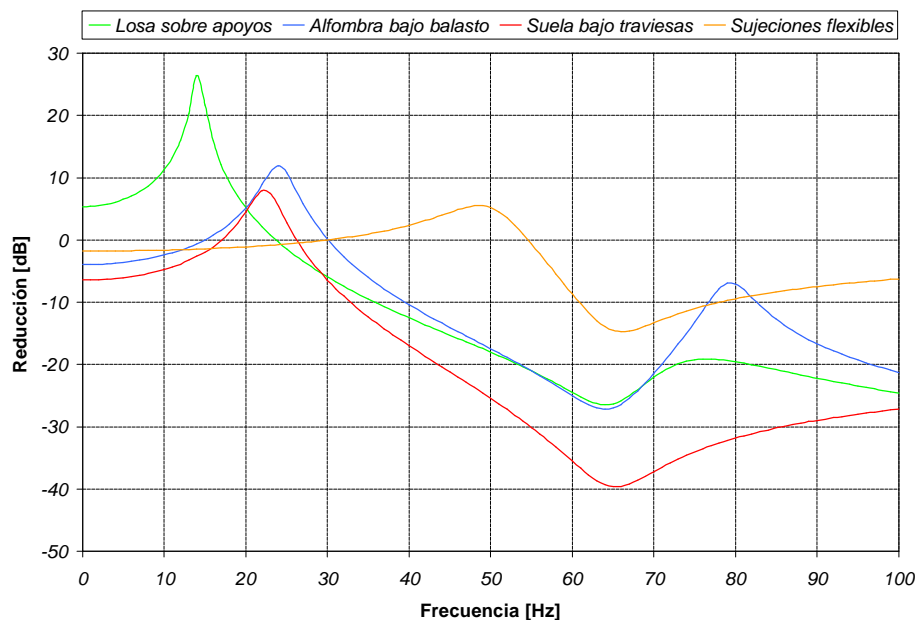


Figura 14: Comparación de soluciones

Precisamente la figura 15 muestra los magníficos resultados conseguidos en el emplazamiento de la figura 2 con la solución de suelas bajo traviesa.

Envolturas-Ensayos caracterización-sótano vertical
C/ Algersuari i Pascual nº 1-3

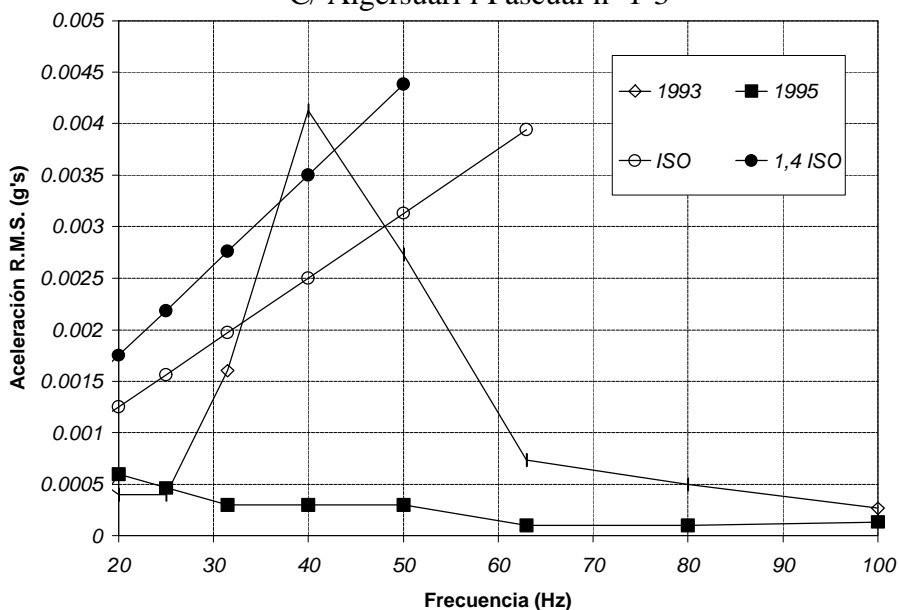


Figura 15: Resultados antes y después de la actuación

Como ya se dijo anteriormente una parte importante de la reducción es debida a la mejora del material móvil circulante y a la renovación llevada a cabo en la vía.

4. CONCLUSIONES

En las líneas anteriores tan sólo se ha pretendido mostrar la utilidad de un método numérico de cálculo para el análisis de situaciones, el estudio comparativo de alternativas y el proyecto de soluciones.

En este caso el procedimiento adoptado, el método de los elementos de contorno (MEC), está especialmente ajustado a las características del problema entre ellas: comportamiento lineal, trabajo en el dominio de la frecuencia, contornos infinitos, incorporación automática del amortiguamiento de radiación., etc.

También es de interés la posibilidad de trabajar a dos niveles, utilizando el MEC para obtener la impedancia dinámica del medio, incluyendo sostenimiento del túnel y edificios adyacentes, que luego se incorpora a modelos tradicionales. Ello abre la posibilidad del uso de la metodología a otro tipo de problemas¹⁸.

5. AGRADECIMIENTOS

Se quiere hacer constar el agradecimiento de los autores a los profesores Julián Mateos y Pedro Museros que han colaborado en diferentes etapas en el desarrollo de los resultados y, sobre todo, a los ingenieros de la Dirección General de Infraestructura del transporte, Julián Santos, Emilio García Arenas e Ignacio Alonso sin cuyo interés, entusiasmo y comprensión hubieran sido imposibles estos estudios.

REFERENCIAS

- [1] Ch. H. Dowding, *Construction Vibrations*, Prentice Hall (1996)
- [2] H. Bachmann et al., *Vibrations problems in structures*, Birkhäuser Verlag (1995)
- [3] L. Fybra, *Vibrations of solids & structures under moving loads*, Noordhoff (1972)
- [4] D.D. Barkan, *Dynamics of bases and foundations*, Mc Graw Hill (1962)
- [5] F.E. Richart, J.R. Hall and R.D. Woods, *Vibrations of soils and foundations*, Prentice Hall (1970)
- [6] R.I. Skinner; W.H. Robinson; G.H. McVerry, *Seismic isolation*, Wiley (1999)
- [7] D.J. Mead, *Passive vibration control*, Wiley (1999)
- [8] R. Abascal, J. Dominguez, *Vibrations of footings on zoned viscoelastic soil*, J. Eng. Mech. ASCE, Vol. 112 (1986)
- [9] T.G. Gutowski, C.L. Dym, *Propagation of ground vibration. A review*, J. Sound vib. 49, 179-193 (1976)
- [10] T. Balendra, K.H. Chua, K.W. Lo. S.L. Lee. *Steady-state vibration of subway-soil-building systems*. J. Eng. mech.. ASCE 115; 145-162 (1989)
- [11] K.H. Chua, T. Balendra, K.W. Lo. *Groundborne vibrations due to train in tunnels*, Earth, eng. Str. Dyn 21; 445-460 (1992)
- [12] J. Avilés, F.J. Sánchez-Sesma, *Foundation isolation from vibrations using piles as barriers*, J. Geotech. Eng. Vol 114, nº 11 (1988)
- [13] D.E. Beskos, B. Dasgupta, I.G. Verdoulakis, *Vibration isolation using open or filled trenches 2D homogeneous soil*, Comport. Mech. Vol. 1 (1986)
- [14] B.K. Banerjee, S. Ahmad, K. Chen, *Advanced application of BEM to wave barriers in multi-layered 3D soil media*, Earth. Eng.& Struc. Dynam. Vol. 16 (1988)
- [15] J. Mateo, *Aislamiento de vibraciones generadas por el tráfico ferroviario*, U.P.M. (1994)
- [16] J. Mateo, E. Alarcón, *Efectividad de trincheras y pantallas en el aislamiento de las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario subterráneo*, Anales de Ing. Mecán. año 10, Vol. 1, pp. 307-314 (1994)
- [17] F. De Cock; C. Legrand, *Ground vibration isolation using gas cushions*, Geotextiles, geomembranas and related products, Ed. G. Den Hoedt, 4th. Int. Conference, (1990)
- [18] K.L. Knothe, S. L. Grassie, *Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies*, Veh. Syst. Dynam, 22, 209-262 (1993)