

BASES DE UN MODELO SEMIANALÍTICO DE PREDICCIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE VIBRACIONES CAUSADAS POR FERROCARRIL

J. Cardona^a, J. Romeu^b, A. Sánchez^b, R. Arcos^b, I.A. Berriategortua^c

^a AV Ingenieros. c/ Abat Marcet, 41 Bajos. 08173 Sant Cugat del Vallès

^b Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, LEAM. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.
c/ Colom, 11. 08222 Terrassa.

^c Dirección General de Ferrocarriles, Ministerio de Fomento. Plaza Sagrados Corazones, 7. 28036, Madrid.

jcg@avenginyers.com

Resumen

Existen diferentes métodos y modelos estandarizados para el cálculo predictivo de la afectación sonora que provocaran las infraestructuras a su entorno (por ejemplo NMPB Routes-96 para carreteras y SRM-II para ferrocarriles). Pero en lo que a vibraciones se refiere, aún no existe ningún modelo o procedimiento estandarizado, nacional o internacional, que permita la predicción de los niveles vibratorios que generará una determinada infraestructura ferroviaria, aunque sí existan aproximaciones al problema planteadas por diferentes investigadores de todo el mundo.

El presente artículo presenta las bases de un modelo de ingeniería en desarrollo para la predicción de las vibraciones generadas por la explotación de infraestructuras ferroviarias, que incluye la propagación de las vibraciones a través del terreno así como a su transmisión a las edificaciones adyacentes. El modelo considera como dato de partida un valor de vibración de referencia cercano a la infraestructura y determina el nivel de vibración en un punto alejado una distancia r , teniendo en cuenta las atenuaciones por expansión del frente de onda y la debida al propio material del terreno, así como el efecto de la estructura del edificio y de la amplificación del forjado, en función de las características de éstos. Aunque el modelo completo considera los efectos del edificio, el presente artículo se centra en la propagación de las vibraciones a través del terreno.

Palabras-clave: predicción, propagación, vibraciones, ferrocarril.

Abstract

There are different methods and standardized models to simulate the acoustic behavior of the transportation infrastructure over its surroundings (p.e. NMPB Routes-96 for roads and SMR-II for railways). But in the vibration field, there is not still any model or standardized procedure, national or international, to predict the vibration levels generated by railways although some approximations to the problem given by different investigators all over the world can be found.

In this paper the basis of an engineering prediction model under development are presented. The model allows the prediction of the ground-borne vibration propagation through soil and housing structures due to the exploitation of railway infrastructures. As input, the model considers a reference vibration level near the infrastructure and calculates the ground vibration level at a distance r , considering the wave-front expansion and the soil material attenuations, as well as the structure and framework effects as a function of their structural and strength features. Although the model considers housing structures, this paper is focused on the ground-borne vibration propagation.

Keywords: prediction, propagation, ground-borne vibrations, railway.

1 Introducción

La afectación por ruido y vibraciones es una de las que más quejas provoca entre la sociedad, según monográfico del Defensor del Pueblo 2005 [1]. Paralelamente y en consonancia con este aumento de sensibilidad de la sociedad, las diferentes administraciones han definido o están definiendo el marco legal entorno al ruido y las vibraciones. Uno de los aspectos tratados por estas normativas son las zonas de servidumbre de las infraestructuras, definidas como zonas del territorio donde se superan los niveles de ruido límite establecidos (en función del uso). Pero sólo se hace referencia a los niveles sonoros, dejando de esta forma sin tratar la vertiente vibratoria del problema.

El motivo por el que las zonas de servidumbre no se definen también según el criterio de vibraciones es que, a día de hoy, no es posible predecir con suficiente fiabilidad la zona de afectación por vibraciones causadas por una infraestructura ferroviaria. En cambio, en acústica existen diferentes modelos que permiten llevar a cabo una predicción de la zona del territorio afectada por determinados niveles sonoros. Una de las causas de esta diferencia entre la predicción acústica y la vibratoria es la mayor complejidad del caso vibratorio, ya que mientras en acústica es asumible la homogeneidad del medio de propagación (el aire), en el caso vibratorio el medio de propagación (el terreno) es heterogéneo y estratificado. Así mismo, también resultan de mayor complejidad en el caso vibratorio la definición de la fuente (un tren es una fuente lineal finita y en movimiento), el comportamiento de los campos próximo y lejano, las interacciones entre los diferentes subsistemas o el efecto de la dinámica sobre el conjunto infraestructura-terreno, con la posible aparición del *Ground Vibration Boom* según sea la velocidad de circulación del tren y las características del terreno [2,3].

El presente artículo propone un modelo de ingeniería que tiene en cuenta los diferentes mecanismos que intervienen en la propagación de las vibraciones a través del terreno y su transmisión y propagación a lo largo de las estructuras de los edificios, con el fin de disponer de una herramienta ágil y fiable para determinar las zonas del territorio afectadas por determinados niveles de vibración causados por la explotación de infraestructuras ferroviarias.

El modelo propuesto está en fase de validación, por lo que en este artículo se presentan resultados parciales de la investigación que se está aún llevando a cabo.

2 Modelos de predicción de vibraciones

Actualmente existen diferentes aproximaciones al problema de la predicción de la propagación de vibraciones causadas por infraestructuras ferroviarias, todas ellas correctas para la aplicación en cuestión pero en muchos casos no extrapolables a otras condiciones [4,5,6]. Todo ello se puede resumir en tres tipologías de modelos:

- **Modelos empíricos**
Modelos basados en el promedio estadístico de gran cantidad de resultados experimentales, que habitualmente parten de un valor de vibración para modificarlo según el comportamiento determinado estadísticamente [7,8].
- **Modelos analíticos**
Modelos basados en expresiones analíticas que parten de las ecuaciones de onda y de la elasticidad, y que definen el campo de desplazamientos, considerando las características de todos los elementos. Son modelos de difícil aplicación debido a que requieren un gran conocimiento del tema así como un conjunto de datos considerable y precisos [6,9,10].

- **Modelos numéricos**

Modelos basados en técnicas FEM o combinación FEM-BEM, cuya aplicación suele dar resultados aceptables pero que requiere gran cantidad de datos así como de recursos (de computación) y tiempo [11,12]. Por estos motivos, tal vez su aplicación tenga más sentido en situaciones concretas no tipificadas o de riesgo.

En conjunto, algunos autores reconocen la variabilidad de resultados así como la necesidad de un mayor volumen de datos [13].

3 Modelo de predicción propuesto

El objetivo es desarrollar un modelo de ingeniería, que permita determinar el nivel de vibración en diferentes puntos alejados de la infraestructura durante la explotación habitual de ésta, y consumiendo el mínimo de recursos.

Por tanto, y a partir de lo comentado en el apartado anterior, se elige un modelo semi-analítico que parte de la expresión de la propagación de ondas en el terreno desarrollada por Lamb [14] y aplicada por Barkan [9], y que se valida mediante medidas experimentales. La expresión que rige el modelo es:

$$v_b = v_a \cdot \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma \cdot e^{\alpha(r_a - r_b)} + K \quad (1)$$

donde

γ es la atenuación geométrica, debida a la expansión del frente de onda.

α es la atenuación material, debida a la disipación de energía en el seno de terreno.

K hace referencia al comportamiento vibratorio del edificio.

El modelo permite determinar la velocidad de vibración en un punto b , v_b , a partir de la velocidad de vibración en un punto a conocido, v_a , y de la relación de distancias entre ambos puntos, r_a/r_b , afectado todo ello por las atenuaciones geométrica, γ , y material, α .

De forma paralela a los modelos de impacto acústico [15], el modelo semi-analítico de propagación de las vibraciones que se propone se fundamenta en los siguientes supuestos:

- Nivel de vibración de referencia, v_a a una distancia r_a , determinado empíricamente para diferentes tipos de tren y superestructura, considerándose ésta como un solo bloque, por lo que no se entra en detalle en la influencia de cada elemento que la compone (carril, sujeción, traviesa y lecho elástico).
- Reproducción de la propagación de vibraciones en el terreno atendiendo a sus principios físicos, y no a parámetros estadísticos hallados de un conjunto de mediciones:
 - o La atenuación geométrica, γ , se determina considerando el tren como una fuente dinámica finita y multi-puntual, donde cada uno de los bogies representa cada una de las fuentes puntuales en que se divide el tren. Hasta el momento, el valor de este parámetro se ha calculado para casos ideales de fuente puntual y fuente infinita, ambas estáticas.

- La atenuación material, α , se determina en función de la frecuencia y considerando el terreno como homogéneo, isótropo y linealmente visco-elástico. Hasta el momento, muchos autores utilizan valores independientes de la frecuencia [9,21].
- La transmisión y propagación de las vibraciones a lo largo de las estructuras de las viviendas se representa mediante el coeficiente K y será una adición o sustracción de nivel de vibración respecto el nivel a pie de edificio, en función de:
 - Acoplamiento terreno-edificación, que se considera limitado a losa superpuesta. Otros tipos especiales de cimentación se considera preferible que se estudien mediante métodos numéricos.
 - Amplificación/reducción de las vibraciones en la edificación debido al efecto de la estructura y del forjado, basado en el comportamiento físico de la estructura y no en tratamiento estadístico de las mediciones.

4 Nivel de referencia

Como dato de partida del modelo, se requiere un valor de vibración de referencia, v_a , a una distancia de referencia, r_a . Este nivel de referencia se establece de forma empírica a partir de medidas experimentales.

Hasta el momento se han caracterizado los niveles provocados por la circulación superficial de trenes de cercanías, regionales, largo recorrido (Arco, Talgo), alta velocidad (Euromed) y mercancías. Los tipos de superestructura sobre las que se han registrado dichos niveles son: balasto, Stedef i Rheda 2000. Pero esta base de datos debe suponer sólo un documento de partida que se debe complementar con más datos a medida que los investigadores vayan recogiendo, de forma que se cree una base de datos abierta de niveles de referencia provocados por la circulación de trenes, considerando las diferentes tipologías de trenes así como diferentes tipos de superestructura.

4.1 Rugosidad

Sin ánimo de entrar en detalle en los diferentes mecanismos que intervienen en la generación de vibraciones debido al contacto rueda-carril, es conocido que la rugosidad de rueda y carril es uno de los tres mecanismos principales de generación de vibraciones.

En la literatura se pueden encontrar datos experimentales que relacionan nivel de rugosidad con nivel sonoro, indicando una relación lineal entre ambos parámetros [16]. Sin embargo, apenas se encuentran datos sobre la relación entre rugosidad y nivel de vibración, ni tampoco un modelo que relacione ambas variables, aunque sí es conocida la influencia del nivel de rugosidad sobre el nivel de vibración puesto que la mayoría de operadores ferroviarios realizan labores de mantenimiento de ruedas y carriles con el objetivo de reducir la generación de vibraciones.

El modelo de predicción propuesto tiene en cuenta el efecto de la rugosidad sobre la generación de vibraciones introduciendo una corrección por rugosidad en el nivel de vibración de referencia. Dicha corrección por rugosidad se determina de forma experimental.

Hasta el momento se ha determinado la influencia de la rugosidad del carril sobre el nivel de vibración generado, por lo que queda pendiente determinar la influencia de la rugosidad de las ruedas así como el efecto combinado de ambas rugosidades sobre el nivel de vibración generado.

Los ensayos para determinar la influencia de la rugosidad del carril sobre el nivel de vibración generado se han realizado en un tramo de la red de Metro de Barcelona, con la colaboración de TMB, y han consistido en medidas de vibración y de rugosidad de carril en un emplazamiento determinado antes y después de que la vía fuera sometida a las tareas de mantenimiento habituales, consistentes en un reperfilado y un esmerilado de los carriles, de forma que la variación de los niveles de vibración registrados es asociable a la variación de la rugosidad del carril.

La medida de rugosidad se llevó a cabo con un rugosímetro tipo TRM02 de ODS, obteniendo los resultados que muestra la Figura 1, donde en *a)* se observa la variación de rugosidad del carril debido a las tareas de mantenimiento de éste, y en *b)* se observa la variación del espectro de vibración vertical en el hastial del túnel debido a la reducción de la rugosidad del carril.

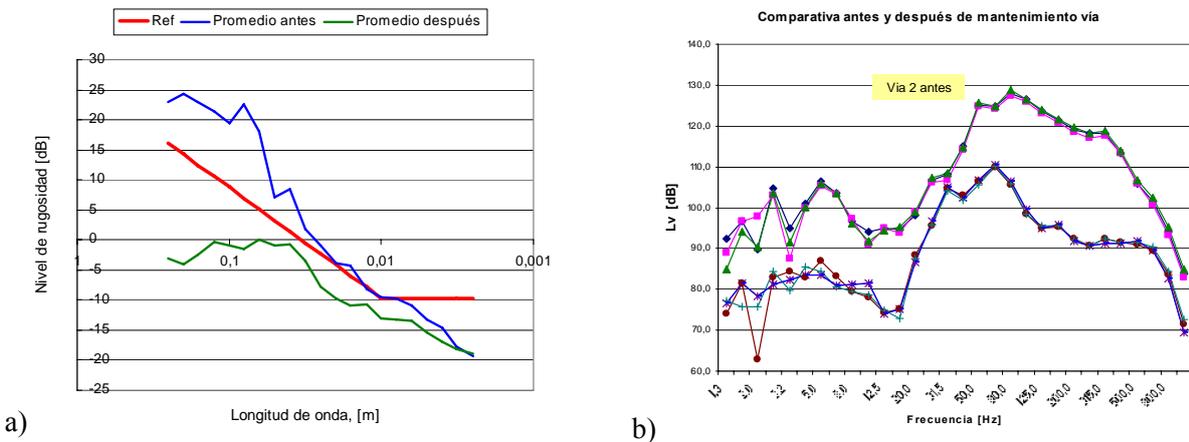


Figura 1 - a) Rugosidad de carril antes (azul) y después (verde) de las tareas de mantenimiento del carril, respecto a la curva de referencia según ISO 3381:2005 e ISO 3095:2005. b) Niveles de vibración, por tercios de octava, medidos antes y después de las tareas de mantenimiento del carril para diferentes pasos de trenes en servicio.

La gráfica *a)* anterior muestran claramente un descenso de la rugosidad del carril, cuantificable en 21,8 dB, cuando es sometido a tareas de mantenimiento, lo que provoca una reducción del nivel de velocidad de vibración vertical en el hastial del túnel de 12,4 dB (gráfica *b)*), especialmente apreciable para frecuencias mayores de 40 Hz.

Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por otros autores en lo que se refiere a generación de vibraciones, donde se indica que para bajas velocidades el principal mecanismo que interviene en la generación de vibraciones es la rugosidad del carril [18].

4.2 Velocidad de circulación

Otro parámetro que influye sobre el nivel de vibración de referencia es la velocidad de circulación de los trenes, especialmente a medida que aumenta la velocidad. Algunos autores [17] apuntan que la velocidad de circulación y el nivel de vibración generado se relacionan según la expresión (2), que supone un incremento de 6 dB al doblar la velocidad:

$$Adjustment = 20 \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (2)$$

En el caso de metros urbanos, se han determinado experimentalmente los niveles de vibración para diferentes condiciones, en diferentes puntos y para un rango de velocidades entre 40 y 60 km/h, determinándose que la variación de vibración en este rango de velocidades es apenas perceptible y, por tanto, no sigue la expresión (2). Este hecho viene a confirmar lo indicado por otros autores [18,19] referente a una velocidad umbral por debajo de la cual el término dinámico apenas tiene influencia en el nivel de vibración. La Figura 2.a) muestra lo comentado.

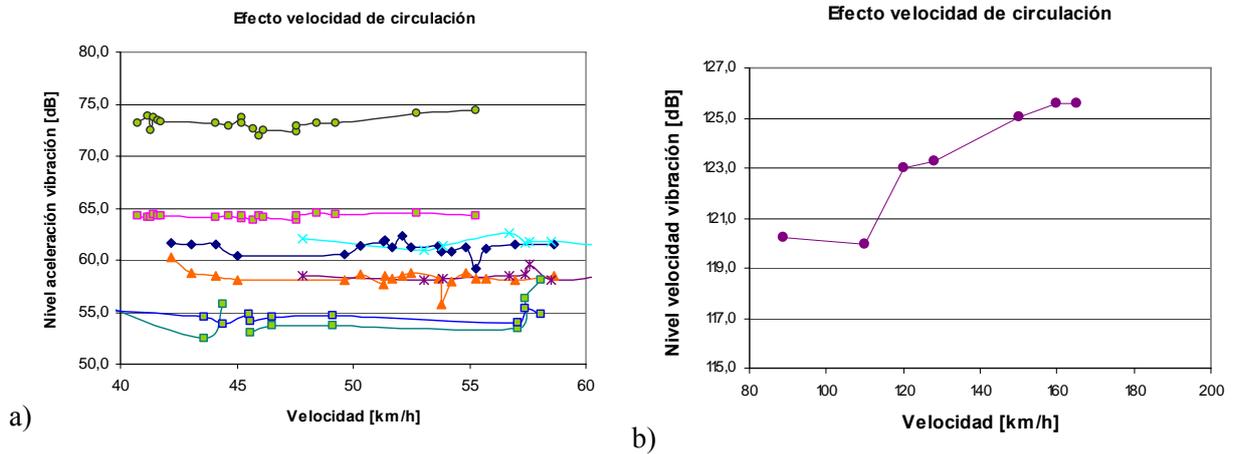


Figura 2 - Variación del nivel de vibración para diferentes velocidades de circulación y para diferentes condiciones, a) para el caso de metros urbanos, b) para el caso de trenes de largo recorrido.

Con el fin de analizar el comportamiento vibratorio para mayores velocidades de circulación, se han llevado a cabo medidas de vibración al paso de trenes de largo recorrido, determinando experimentalmente la variación del nivel de vibración respecto a la velocidad de circulación. El rango de velocidades analizado está comprendido entre los 80 y 170 km/h, y se han obtenido los resultados que muestra la Figura 2.b), donde se observa una relación directamente proporcional entre el nivel de vibración y la velocidad de circulación, aunque en la zona próxima a los 100 km/h se observe una ligera desviación respecto a la tendencia comentada.

De hecho, se observa que para velocidades mayores a 100 km/h la relación entre la velocidad de circulación y el nivel de vibración se ajusta de forma considerable a la relación indicada en la expresión (2), tal como muestra la Figura 3:

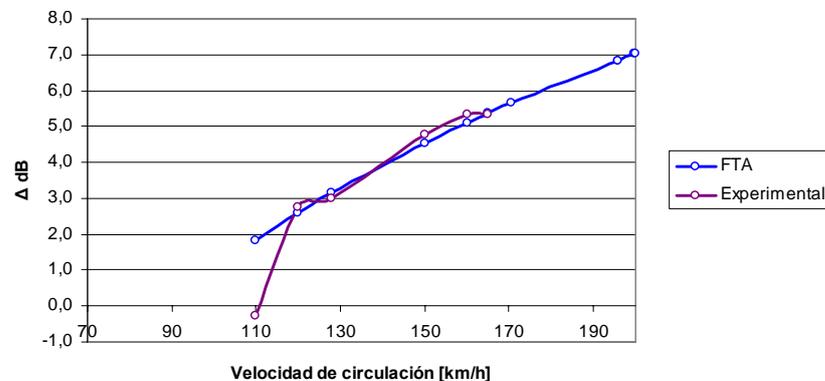


Figura 3. Relación entre variación del nivel de vibración y variación de velocidad de circulación, según ecuación (2) de la FTA y según los datos experimentales obtenidos en la campaña de medidas.

5 Propagación de vibraciones

Una vez establecido el nivel de vibración de referencia a considerar en función de las variables descritas en los apartados anteriores, el modelo determina la atenuación de dicho nivel de vibración en función de la distancia. Para ello, se considera que la energía vibratoria que se propaga a través del terreno se atenúa debido a la combinación de dos fenómenos: la atenuación geométrica, γ , y la atenuación material, α .

Para simplificar la realidad se caracteriza el terreno como un semi-espacio infinito, homogéneo, isótropo y linealmente visco-elástico, donde la circulación de un tren provocará un sistema de ondas que se propagarán desde la fuente hasta el receptor, y que estará compuesto por ondas volumétricas P y S, y ondas superficiales de Rayleigh, transmitiéndose cada una de ellas a una velocidad de propagación característica y con un ratio de atenuación propio [9,14].

5.1 Atenuación geométrica, γ .

La atenuación geométrica hace referencia a la pérdida de energía debido a la expansión y aumento del radio de acción de la onda cuando ésta se aleja de la fuente, lo que provoca la distribución de la energía en una superficie mayor y, por tanto, una disminución de la intensidad de energía.

Por tanto, este coeficiente dependerá del tipo de fuente considerada (puntual, infinita o finita, como se verá más adelante), de su localización (en superficie o soterrada) y del tipo de ondas sísmicas que genere (superficiales o volumétricas), tomando un valor para cada una de las posibles situaciones. Los valores teóricos de este parámetro se resumen en la Tabla 2 [2].

Tabla 2. Valores teóricos del coeficiente de atenuación geométrica para diferentes tipos de fuente teóricas.

Tipo de fuente	Localización	Onda	γ
Puntual	Superficie	Rayleigh	0,5
	Superficie	Volumétricas	2
	Interior	Volumétricas	1
Lineal	Superficie	Rayleigh	0
	Superficie	Volumétricas	1
	Interior	Volumétricas	0,5

Pero realmente un tren no se puede considerar ni como una fuente puntual ni como una fuente lineal infinita, si no que debe considerarse como una fuente de longitud finita. Además, los valores teóricos de la Tabla 2 se han obtenido considerando las fuentes estáticas mientras que en el caso de un tren debe considerarse su velocidad de circulación. Por todo ello, las medidas experimentales llevadas a cabo muestran cierta divergencia en los valores de γ teóricos y los hallados experimentalmente.

5.1.1 Atenuación geométrica para el caso de trenes

Con el fin de mejorar la definición del tren como fuente de vibración y de esta forma corregir la divergencia entre los resultados teóricos y experimentales, se define el tren como una fuente de vibración multi-puntual compuesta por diferentes fuentes puntuales (no correlacionadas) que representan los diferentes bogies del tren, tal como muestra la Figura 3.

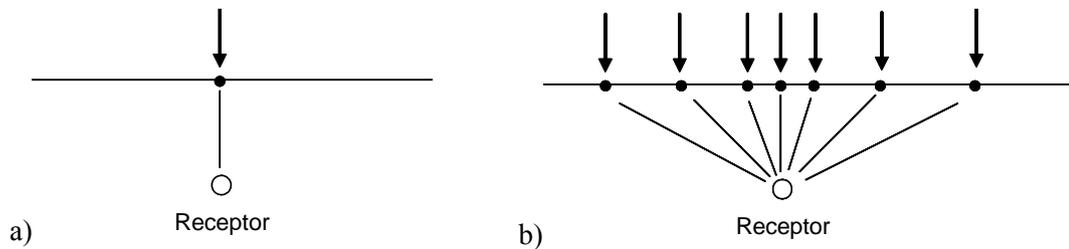


Figura 3. Esquemas de a) fuente puntual y b) fuente multi-puntual.

Con este tipo de fuente y considerando su velocidad de circulación, se modela la propagación de las diferentes ondas sísmicas para determinar el valor del coeficiente de atenuación geométrico para cada una de ellas.

Para el caso, por ejemplo, de las ondas de compresión, P, generadas durante la circulación en superficie de un tren compuesto por 5 coches, los resultados que se obtienen son los de la Figura 4, donde el gráfico a) muestra el desplazamiento superficial debido al paso de cada uno de los bogies del tren (trazas discontinuas azules), el desplazamiento global (azul claro) y el desplazamiento asociado al tiempo correspondiente al paso del tren (traza en rojo), en un receptor alejado 5 m de las vías, y el gráfico b) muestra el desplazamiento temporal debido al paso del tren en cada uno de los receptores evaluados.

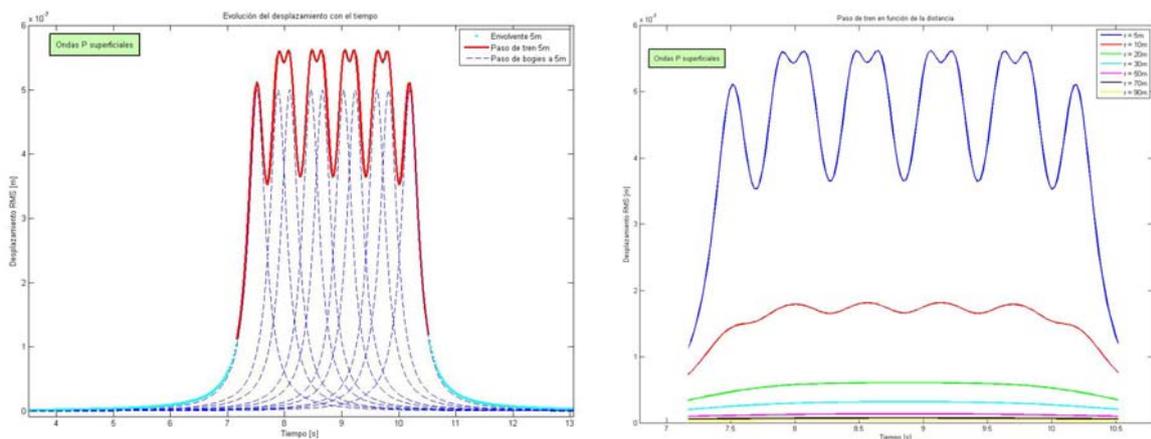


Figura 4. a) Desplazamientos superficiales provocados por el paso de los bogies del tren así como desplazamiento global debido al paso del tren, considerando sólo ondas P, y b) desplazamientos en cada uno de los receptores evaluados.

Partiendo de los desplazamientos temporales en cada uno de los receptores evaluados (Figura 4.b), se determina el desplazamiento *rms* debido al paso de tren en cada receptor calculado a partir del nivel

equivalente de dicho paso de tren. Finalmente, se ajustan dichos niveles a la expresión (3), con lo que se obtiene el valor del coeficiente de atenuación geométrica que los ajusta.

$$v_b = v_a \cdot \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma \quad (3)$$

La Tabla 3 recoge los valores del coeficiente de atenuación geométrica, γ , para las ondas de compresión, P, generadas durante la circulación de un tren en superficie para los casos ideales de fuente puntual y lineal estática, además del caso de tren multi-puntual dinámico.

Tabla 3. Valores del coeficiente de atenuación geométrica para diferentes configuraciones de fuente y ondas P.

Tipo de fuente	Velocidad	Localización	Onda	γ
Puntual	Estática	Superficie	P	2
Lineal	Estática	Superficie	P	1
Multi-puntual	Dinámica	Superficie	P	1,5 – 1,7

5.2 Atenuación material

La atenuación material, α , es el otro fenómeno por el que el nivel de vibración disminuye con la distancia a la fuente y hace referencia a la atenuación causada por la fricción y cohesión entre las partículas del terreno debido al comportamiento visco-elástico de éste [9,14].

El coeficiente de atenuación material, expresado en unidades de m^{-1} , se representa mediante la expresión siguiente [20]:

$$\alpha = \frac{\delta \cdot f}{c_R} \quad (4)$$

donde

- δ es el amortiguamiento interno del terreno, también llamado decremento logarítmico
- f es la frecuencia
- c_R es la velocidad de fase de la onda de Rayleigh

Los datos presentes en bibliografía respecto al valor de este parámetro son muy variables, por lo que se establece una clasificación de los terrenos desde el punto de vista de su comportamiento frente a la propagación, y a la definición de un procedimiento experimental de cálculo del amortiguamiento para cada tipología de terreno.

Esta clasificación se basa en la velocidad de propagación de la onda cortante, v_s y se recoge en la Tabla 4, mientras que el procedimiento experimental para el cálculo del amortiguamiento se detalla en el apartado siguiente.

Tabla 4. Clasificación de los terrenos en función de su velocidad de propagación de la onda cortante.

ID	Tipo terreno	Composición	Vs [m/s]
1	Cuaternario reciente	Arenas, gravas y arcillas	< 300
2	Cuaternario viejo	Similar a ID 1 pero más compactado	300-500
3	Terciario	Pizarras, calizas	500 - 1.500
4	Jurásico Triásico Paleozoico	Rocas sedimentarias	1.500-2.500
5	Rocas ígneas	Rocas ígneas	> 2.500

5.2.1 Determinación experimental del amortiguamiento

Para la determinación experimental del coeficiente α , se procede a excitar el terreno mediante un impacto, registrándose el nivel de vibración en el terreno a corta distancia del punto de impacto. Se determina el valor *rms* de la señal temporal para cada una de las bandas de frecuencias de interés, de modo que obtiene la evolución temporal del valor *rms* para cada frecuencia. La Figura 6.a) muestra lo comentado. A partir de esta señal temporal *rms* y aplicando la ecuación (5), se determina el valor del amortiguamiento interno de terreno, o decremento logarítmico, mientras que el valor del coeficiente de atenuación material se determina mediante la ecuación (4) vista anteriormente. La Figura 6.b) muestra los resultados obtenidos para el caso de los terrenos tipo 2 y 3, apreciándose la evolución del valor de α con la frecuencia.

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \left[\frac{x_i}{x_{i+n \cdot T}} \right] \quad (5)$$

donde

- x_i es el valor rms de la amplitud de la señal temporal en el instante máximo, i .
- $x_{i+n \cdot T}$ es el valor rms de la amplitud de la señal temporal en el instante $i+n \cdot T$, siendo T el periodo correspondiente a la frecuencia evaluada y n el número de ciclos considerados.

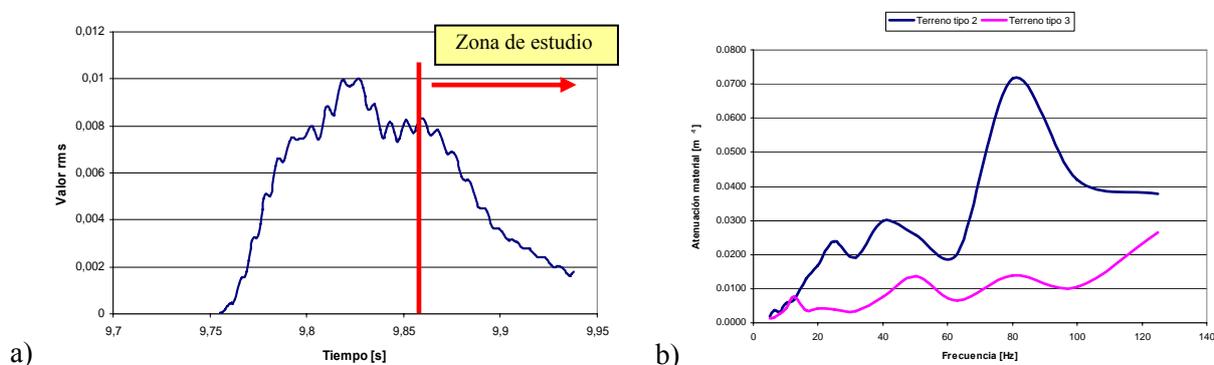


Figura 6. Ejemplo de a) evolución temporal del valor *rms* de la señal de vibración para la frecuencia de 50 Hz, y b) valor del coeficiente de atenuación material, α , en función de la frecuencia para los terrenos tipo 2 y 3.

6 Conclusiones

Se propone un modelo de ingeniería semi-analítico para la predicción de la propagación de las vibraciones provocadas por la explotación de infraestructuras ferroviarias a través del terreno y su posterior transmisión y propagación a través de la estructura de los edificios.

El modelo parte de un valor de vibración de referencia, v_a , en un punto situado a una distancia r_a de la fuente, determinado experimentalmente para diferentes tipos de trenes y diferentes tipos de superestructura. Dicho nivel de referencia está afectado por el efecto de la rugosidad de rueda y carril y por la velocidad de circulación del tren, además de atenuarse con la distancia debido al efecto de la dispersión geométrica y la atenuación de los materiales que componen el terreno.

Se ha comprobado que la rugosidad del carril influye notablemente en el mecanismo de generación de vibraciones para velocidades típicas de Metro, llegando a provocar diferencias de hasta 12,4 dB en el nivel de velocidad de vibración vertical en hastial del túnel.

Paralelamente, se comprueba que para velocidades típicas de Metro, la velocidad de circulación no influye en el nivel de vibración generado, mientras que para mayores velocidades (> 100 km/h) la variación del nivel de vibración con la velocidad de circulación sigue la expresión (2) propuesta por la FTA.

Se define el tren como fuente de excitación de una forma más apropiada, considerándose como una fuente multi-puntual dinámica, donde cada bogie representa cada una de las fuentes puntuales en que se divide el tren. A partir de esta definición de la fuente de excitación, se determinan los coeficientes de atenuación geométrica de las ondas P y para diferentes longitudes de tren, obteniéndose los resultados de la Tabla 3. Estos resultados se presentan en forma de rangos de valores de γ , lo que indica que este parámetro es función de la longitud del tren, con lo que debe definirse un campo próximo y uno lejano.

Finalmente, se establece una metodología para determinar experimentalmente el valor del coeficiente de atenuación material, α . Este procedimiento se aplica a las cinco tipologías de terrenos identificadas y se obtiene el valor de α en función de la frecuencia, dato que hasta el momento muchos autores han obviado.

Agradecimientos

Los trabajos de investigación que han conducido a los resultados expuestos han sido posibles gracias a la financiación del Ministerio de Fomento a través de las ayudas a la investigación según convocatoria de I+D Transportes – 2005, coordinada por el Sr. Ignacio Alonso Berrioategortua, de la Dirección General de Ferrocarriles, y que ha contado con la participación empresarial de SENER, Ingeniería y Sistemas.

Así mismo, agradecer la predisposición del operador del Metro de Barcelona, TMB, para coordinar las tareas de caracterización de la influencia de la rugosidad del carril sobre el nivel de vibración generado.

Referencias

- [1] El Defensor del Pueblo. *Informe sobre ruido*, 2005.

- [2] T. G. Gutowsky, C. L. Dym. Propagation of ground vibration: a review. *Journal of Sound and Vibration*, 49(2), 1976, 179-193.
- [3] Hsiao-Hui Hung, Yeong-Bin Yang. A review of researches on ground-borne vibrations with emphasis on those induced by trains. *Proceedings of National Science Council, Republic of China*. Part A, 25(1), 2001, 1-16.
- [4] C. Madshus, B. Bessason, L. Harvik. Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), 1996, 195-203.
- [5] C.J.C. Jones, J.R. Block. Prediction of ground vibration from freight trains. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 1996, 205-213.
- [6] X. Sheng, C.J.C. Jones, M. Petyt. Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track, *Journal of Sound and Vibration*, 225 (1), 1999, 3-28.
- [7] R.A. Hood, R.J. Greer, M. Breslin. The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnels. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 1996, 215-225.
- [8] H. Kuppelwieser, A. Ziegler. A tool for predicting vibration and structure-borne immissions caused by railways. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 1996, 261-267.
- [9] D.D. Barkan. *Dynamics of Bases and Foundations*. McGraw-Hill. 1962.
- [10] V.V. Krylov, C.C. Ferguson. Generation of surface acoustic waves by moving trains. *Ultrasonics Symposium*, 1993, 769-772.
- [11] L. Gavric. Computation of propagative waves in free rails using a Finite Element technique. *Journal of Sound and Vibration*, 185(3), 1995, 531-543.
- [12] X. Sheng; C.J.C. Jones; D.J. Thompson. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 2006, 575-586.
- [13] G. Degrande, L. Schillemans. Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), 2001, 131-144.
- [14] H. Lamb. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*. 203, 1904, 1-42.
- [15] CETUR, *Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores*, 1980.
- [16] D.J. Thompson. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 1996, 149-160.
- [17] Hanson, C.E.; Towers, D.A., Meister, L.D. *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*. FTA, 2006.
- [18] A.M. Kaynia. Measurement and prediction of ground vibration from railway traffic. *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 3, 2001, 2105-2109.
- [19] A.M. Kaynia, C. Madshus, P. Zackrisson. Ground vibration from high-speed trains: Prediction and Countermeasure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126(6), 2000, 531-537.
- [20] F.E. Richart Jr, R.D. Woods, J.R. Hall Jr. *Vibrations of Soils and Foundations*. Prentice-Hall. 1970.
- [21] C.L. Dym. Attenuation of ground vibration. *Sound and Vibration*, 10, 4, 1976, 32-34.