

PROPAGACIÓN DE VIBRACIONES DE TRENES EN EL TERRENO

PACS: 43.40.Yq

Sánchez, Ángel; Cardona, Joan; Genescà, Meritxell; Pàmies, Teresa
LEAM. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa. UPC
C/ Colom, 11
08222 Terrassa. España
Tel: 937 398 718
Fax: 937 398 022

ABSTRACT

The railway network is rising, for which, it is important to have a tool to predict the vibration level caused by the trains passing-by, and that the prediction tool is adapted to each regions characteristics. The algorithms and models used to predict soil vibration propagation (Barkan expression e.g.) are referred to a punctual vibration source whereas a train could be considered as a linear source. The results allow to obtain a ground vibration propagation model adjusted to the constructive and soil characteristics of the measurement sites, as well as to determine the frequency influence on the attenuation process during the ground vibration propagation.

RESUMEN

La red ferroviaria está creciendo, por lo que es importante tener una herramienta para predecir el nivel de la vibración causado por el paso de trenes, y que esta herramienta de predicción esté adaptada a cada tipo de región. Los algoritmos y los modelos usados para predecir la propagación de la vibración en el terreno (la expresión de barkan v.g.) se refieren a una fuente puntual de vibración mientras que un tren se podría considerar como fuente lineal. Los resultados permiten obtener un modelo de la propagación de vibración en el terreno ajustado a las características constructivas y del terreno de los lugares de medida, así como determinar la influencia de la frecuencia en el proceso de la atenuación, durante la propagación de la vibración en el terreno.

INTRODUCCIÓN

En estos últimos años se esta produciendo un gran desarrollo de las infraestructuras ferroviarias en el estado Español, cosa que se traduce en un incremento tanto del numero de vías ferroviarias como de la frecuencia del paso de trenes por las ya existentes. Este hecho, que supone un desarrollo de la sociedad del bienestar, tiene como contrapartida el problema de la contaminación ambiental en forma de ruido y vibraciones.

Las vibraciones provocadas por el paso de los trenes son importantes porque pueden provocar desperfectos en edificios adyacentes al trazado de la vía. Estos defectos pueden ser causados tanto por la vibración inducida como por las vibraciones transmitidas directamente a

las estructuras. El análisis de estas vibraciones es complejo y requiere tener en cuenta diferentes parámetros como el tipo de fuente que causa la vibración, los parámetros que definen el camino de propagación y la respuesta del edificio [1]. Se han desarrollado, y se siguen desarrollando, diferentes modelos de predicción de transmisión de vibraciones a través del terreno. Algunos de ellos no están completamente validados o, si lo están, lo están por unas condiciones geológicas de camino de transmisión muy determinadas y que en muchos casos no son extrapolables a otros lugares, donde las características geológicas no son diferentes [2].

Se han realizado medidas de vibraciones causadas por el paso de trenes para diferentes configuraciones de vía: vía en superficie, vía en falso túnel y vía en túnel. El análisis de las medidas ha permitido caracterizar la ley de propagación de las vibraciones para cada topología de fuente.

MODELO DE PROPAGACIÓN DE VIBRACIONES EN EL TERRENO

El modelo utilizado para el análisis de la propagación de vibraciones causadas por el paso de trenes a través del terreno, fue formulado por Barkan, el cual caracteriza la propagación de vibraciones según la expresión

$$V_b = V_a \cdot \left(\frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma \cdot e^{\alpha \cdot (r_a - r_b)} \quad (1)$$

donde V_a y V_b son los valores de velocidad de vibración en los puntos situados a las distancias r_a y r_b de la fuente, γ es el coeficiente de atenuación geométrica, y α es el coeficiente de atenuación del material.

El proceso de propagación de vibraciones a través del terreno desde la fuente hasta un receptor alejado, provoca una disminución de la vibración debido a dos fenómenos: la atenuación geométrica, debido a la expansión del frente de onda y representada por γ , y la atenuación del material, debido a la disipación de energía en el interior del terreno y representada por α .

La atenuación geométrica, γ , depende del tipo de onda generada por la fuente de vibración. Considerando una fuente de vibración en un semiespacio elástico, se generan tres tipos de onda: una onda superficial, onda de Rayleigh, y dos ondas llamadas de volumen. De estas ondas de volumen, una de ellas se propaga a la velocidad de la onda longitudinal de un sólido elástico (onda P) y el otro se propaga a la velocidad de la onda transversal (onda S), que es intermedia entre la velocidad de las ondas longitudinales y la de las ondas de Rayleigh.

La atenuación geométrica es debida al decremento de la densidad de energía con la distancia a la fuente, y se puede determinar a partir del tipo de onda de propagación, el tipo de fuente y la localización de ésta [3], tal como muestra la tabla 1.

Respecto a la atenuación material, α , esta es debida a la fricción y cohesión entre las partículas del terreno provocadas porque el suelo no es perfectamente elástico. Por lo tanto, este coeficiente estará afectado por las características geológicas del terreno a través del cual tiene lugar la propagación, además de la frecuencia según la expresión 2.

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

Tabla 1: Coeficiente teórico de amortiguación geométrico para varias fuentes y tipos de onda.

$$\alpha = \frac{\pi \cdot \eta \cdot f}{c} \quad (2)$$

donde η es un factor de pérdida, f es la frecuencia de la onda y c la velocidad de propagación de la onda. Entre la relación lineal o exponencial de α , parece que la exponencial es más aproximada [3].

MEDIDAS EXPERIMENTALES

Se han realizado medidas de vibración que recogen las tres configuraciones de vía más habituales a la zona y son: vía en superficie, vía en falso túnel y vía en túnel real (hecho con tuneladora). La diferencia entre fuente falso túnel y túnel real radica en el hecho que el falso túnel está construida a partir de muros de contención sobre el cual descansa una losa de hormigón, mientras el túnel real se crea a partir de la perforación del terreno, quedando compacto el terreno de alrededor.

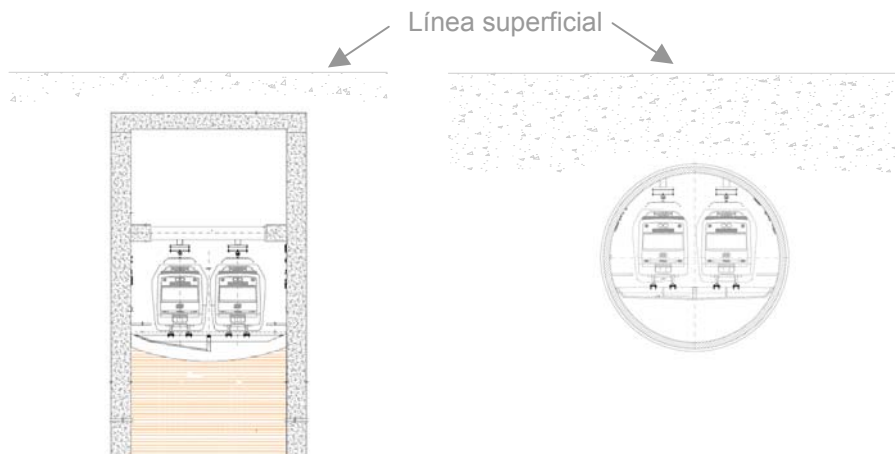


Figura 1: Ejemplos de falso túnel (izquierda) y de túnel verdadero (derecha).

Las medidas de vibración se han llevado a cabo en vías situadas en la zona norte-este de España. Las características geológicas que predominan para cada tipo de infraestructura son:

- Vía en superficie: principalmente piedras calizas y guijarros encajados en una matriz de mezcla de arena y arcilla.
- Falso túnel: arenas, limo y gravas.
- Túnel: gravas, arenas y argilas. Con menos presencia: conglomerado calcáreo.

RESULTADOS DE MEDIDAS EXPERIMENTALES

El objetivo de estas medidas sobre diferentes configuraciones de vía es determinar como varían los valores de los parámetros α y γ en cada caso, y así poder determinar cuales son los mecanismos de transmisión de las vibraciones a través del terreno en estas zonas.

El parámetro medido es el valor eficaz de la señal de velocidad en sentido vertical, obtenido con un detector de media exponencial de un segundo. En todos los casos, las medidas de vibración se realizan en la superficie, en ningún caso se hacen medidas de vibración con el transductor enterrado.

Vía superficial

Las medidas de vibración se hicieron en un tramo de vía recto donde la velocidad máxima de los trenes era 220 km/h. Las características geológicas que predominan en la zona son las comentadas anteriormente, y las medidas del nivel de vibración se realizaron a unas distancias de 10 m, 25 m, 50 m y 100 m de la vía.

Estas medidas demuestran que los valores de los coeficientes de atenuación γ y α , podrían tomar diversos valores dentro de una gama estrecha, implicando así, un error mínimo.

Para determinar el rango dentro del cual se encontraran los valores de estos coeficientes, se hacen dos supuestos: i) se determina el rango de α cuando γ es 0, ii) se determina el rango de γ cuando α es 0.

La Figura 2 muestra los valores de vibración para diferentes pasos de tren. Sobre estos niveles de vibración se aplica un ajuste considerando: i) solo la atenuación geométrica, ii) considerando la atenuación geométrica y la atenuación material:

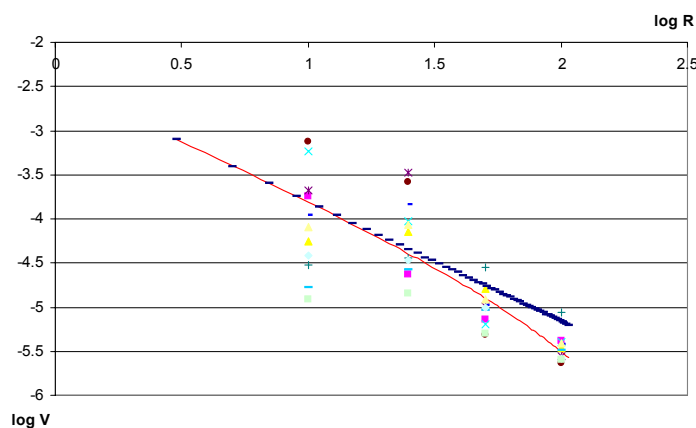


Figura 2: Ajuste de la expresión de Barkan para el ferrocarril superficial.

Vías en túnel

Las medidas de vibración se llevaron a cabo en una zona urbana por donde circula un ferrocarril urbano que discurre bajo tierra. En este caso, el tipo de tren que circulaba por la vía era siempre el mismo. Las medidas se hicieron de noche para evitar la contaminación de la señal debido a la presencia de otras fuentes. Las medidas se hicieron en una calle que transcurre perpendicular al curso de la vía y a unas distancias de 9 m, 15 m, 22 m y 43 m.

La Figura 3 muestra los valores de vibración para diferentes pasos de tren y para los casos i) en que solo se considera el efecto de atenuación geométrica, ii) se considera la atenuación geométrica y la material:

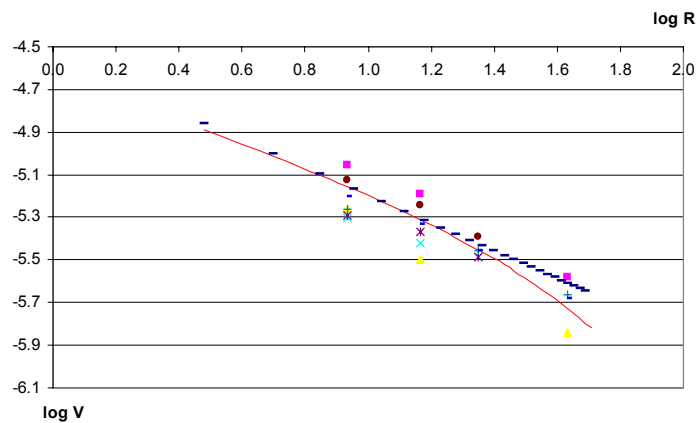


Figura 3: La expresión teórica de Barkan ajustada para datos experimentales aptos a vías en túnel verdadero.

Vías en falso túnel

Finalmente, las medidas de vibración para el caso de tener una infraestructura ferroviaria en falso túnel también se hicieron en zona urbana, aunque en este caso era un parque sin tránsito de vehículos y a una distancias de la vía de 12 m, 28 m y 62 m.

Como en los casos anteriores, los valores experimentales se ajustan considerando solo el efecto de la atenuación geométrica y considerando el efecto conjunto de la atenuación geométrica y la atenuación material. Esto es lo que se muestra en la Figura 4:

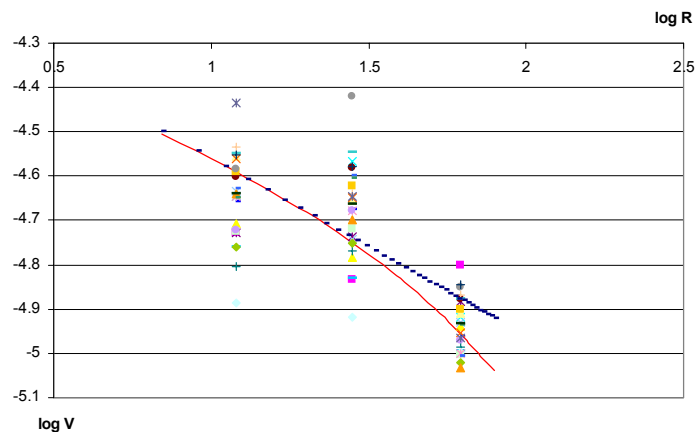


Figura 4: La expresión teórica de Barkan ajustada para vías en falso túnel.

	Vía en superficie	Vía en túnel	Vía en falso túnel
$\alpha = 0$	$\gamma = 1,35 - 1,5$	$\gamma = 0,65 - 0,75$	$\gamma = 0,38 - 0,45$
$\gamma = 0$	$\alpha = 0,034 - 0,04 \text{ [m}^{-1}\text{]}$	$\alpha = 0,025 - 0,035 \text{ [m}^{-1}\text{]}$	$\alpha = 0,012 - 0,017 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

Tabla 2: Resumen de posibles valores de γ y α que ajustan los datos experimentales a la expresión de Barkan

Valoraciones de las medidas

Las medidas experimentales de vibración debido al paso del tren muestran que no se puede asegurar que unos determinados valores de α y γ ajusten bien estas medidas a la expresión teórica de Barkan.

Un tren es una fuente de vibración en movimiento, cosa que hace que en un punto receptor en un instante de tiempo determinado, se tenga una señal que sea el resultado de la superposición de diferentes eventos vibratorios provenientes de diferentes puntos emisores y desfasados en el tiempo, cosa que afecta a los coeficientes de atenuación geométrica y material.

Para el caso de tren en vía en superficie, las medidas experimentales muestran que el valor del coeficiente de atenuación geométrica está comprendido entre 1,35 y 1,5. Estos valores de γ hacen pensar que las vías en superficie se pueden modelizar como una combinación de fuente puntual y lineal con ondas de volumen. Esta suposición se ve reforzada si se tiene en cuenta que a partir de una cierta distancia del receptor a la fuente, ésta se puede considerar como fuente puntual.

Gutowski y Dym [3] han mencionado que un tren puede molelizarse como fuente lineal de vibración si la relación (3) se cumple.

$$\frac{L}{\pi} < d \quad (3)$$

donde L es la longitud del tren y d es la distancia de la fuente al receptor.

En este estudio la longitud máxima de los trenes es del orden de los 200 m. Así el punto de medida situado a 100 m no cumple la condición de fuente lineal y la de 50 m se encuentra en el límite. Los puntos situados a 10 y 25 m, sí que cumplen la condición de fuente lineal.

Otro aspecto a tener en cuenta al justificar la diferencia entre valores teóricos y experimentales de α , es la diferencia entre fuente lineal finita e infinita, ya que el modelo teórico tiene en cuenta una fuente lineal infinita, mientras que el paso de tren es una fuente lineal finita en movimiento.

Para el caso de vías en túnel, la expresión de Barkam permite un ajuste de los valores experimentales con una γ comprendida entre 0,65 y 0,75. Este rango queda comprendida entre los valores de γ correspondientes a fuente lineal soterrada, γ de 0,5, y una fuente puntual soterrada, γ de 1. Como en el caso anterior, parece claro que el paso de tren por un túnel se puede modelizar como una combinación de efectos de fuente puntual y lineal soterradas con transmisión según ondas de volumen. Se observa que el comportamiento se aproxima más al de una fuente lineal que al de una fuente puntual, ya que si el paso de tren se clasifica como una fuente puntual soterrado, γ de 1, el coeficiente de atenuación geométrica teórica sería más grande que el medido, mientras que si se clasifica como una fuente lineal soterrada, γ de 0,5, el efecto del coeficiente de atenuación material hace que los valores medidos se ajusten mejor a la expresión de Barkan.

Finalmente, en el caso de falso túnel los valores que se obtienen de γ están comprendidas entre 0,38 y 0,45, sugiriendo que este tipo de propagación sea una combinación de fuente puntual y lineal como transmisión por ondas de Rayleigh.

Es difícil seleccionar el mecanismo de propagación debido a la composición del camino de propagación. La existencia de hormigón interactuando con el terreno, puede causar caminos de transmisión preferencial, situación que aún no se ha demostrado.

En referencia al coeficiente de amortiguamiento de material, se obtienen valores experimentales que se ajustan a los publicados por otros autores [5]. En el caso de vías en superficie, donde los materiales predominantes son piedras calizas y arenas, se obtiene un

coeficiente de atenuación comprendida entre 0,034 y 0,04, coincidiendo con los obtenidos por Barkan. En el caso de vía en túnel, los materiales predominantes son gravas, arenas y argilas. El rango de coeficiente de amortiguamiento está comprendido entre 0,025 y 0,035, de acuerdo con el obtenido por Peng y Clough y Chameau. Finalmente, las vías en falso túnel discurren en terrenos compuestos de arenas, limos y gravillas, y los coeficientes de amortiguamiento de material se encuentran entre 0,012 y 0,017, los cuales se aproximan a los obtenidos por Clough y Chameau [5].

CONCLUSIONES

La propagación de vibraciones causadas por paso de tren por tres diferentes configuraciones de vía (superficie, túnel y falso túnel) han sido estudiadas. La expresión teórica de Barkan se ajusta a los datos experimentales para los coeficientes de atenuación geométrica y de amortiguación de material, tomando diferentes valores dentro de un estrecho rango. Esto sugiere que no sólo hay un valor para la expresión de Barkan.

Los valores de γ obtenidos llevan a pensar que se puede modelizar la propagación y como una combinación de fuente lineal y puntual de ondas de volumen de Rayleigh, dependiendo de la configuración de vía. Los valores experimentales de coeficiente de amortiguación del material obtenidos, son similares a los publicados por otros autores para terrenos de características similares.

La propagación y atenuación de la vibración debido al paso de tren se sigue estudiando para obtener un modelo más preciso que se ajuste a los valores experimentales.

REFERENCIAS

- [1] D. Kim, J. Lee, Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **19**, 115-126, 2000.
- [2] G. Alarcón, J. Solé, J. Romeu, J. Cardona, Test and prediction of free field vibrations caused by high-speed trains near the Spanish candidate ITER site, *Proc. 11th International Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, Russia*, 2004
- [3] T.G. Gutowski, C.L. Dym, Propagation of ground vibration: a review, *Journal of Sound and Vibration* **49**(2), 179-193, 1976.
- [4] H. Amick, A frequency-dependent soil propagation model, SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems, Denver, Colorado, 1999.
- [5] H. Amick, M. Gendreau, Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities, *ASCE Construction Congress 6, Orlando, Florida*, 2000.
- [6] C.H. Dowding, *Construction vibration*, Prentice-Hall, 1996.