

EJEMPLO DE CASO PRÁCTICO DE ESTABLECIMIENTO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE VIBRACIONES Y RUIDO FERROVIARIO BASADO EN MEDICIONES

PACS:

Marant, Vincent; Aguilera de Maya, Juan Luís
Acusttel, P.I. Benieto, C/ Transport 12, 46702 Gandía, España, vmarant@acusttel.com
Munguira, Jesús
Typsa, Barrio Peruri 33, 2ª planta, 48940 Leioa, España, jmunguira@typsa.es

Palabras Clave: Vibraciones ferroviarias, Cálculos predictivos, Mediciones

ABSTRACT

Noise and vibrations from a new railway line are often some of the most relevant issues in the design of the new infrastructure and superstructure. There are many theoretical models which allow forecasting future levels in operational phase. In some cases, for example in tunnel, it is even sometimes needed to run more advanced calculations such as finite elements models. However, there are also situations when, due to the advanced status of the civil works, for example, the predictions can be based on the results of the wide measurements campaign performed with this purpose in order to cover and characterize all the potentially relevant aspects. This is the case of the practical example presented here in order to get the most reliable results possible.

RESUMEN

El ruido y las vibraciones que producirá una nueva vía ferroviaria son en muchas ocasiones unos de los asuntos de mayor relevancia en el diseño de la infraestructura y de la superestructura. Existen varios modelos teóricos que permiten predecir los futuros niveles en fase operacional; incluso en algún caso, por ejemplo en túneles, es necesario recurrir a métodos numéricos más avanzados, como el de los Elementos Finitos. No obstante, hay casuísticas en las que por el estado avanzado de las obras, por ejemplo, es posible basar las predicciones en los resultados de campañas de medidas amplias y diseñadas con este propósito para cubrir y caracterizar todos los factores potencialmente relevantes. Este es el caso del ejemplo práctico que se presenta aquí con el fin de obtener los resultados los más fiables posibles.

1. INTRODUCCIÓN

El ejemplo práctico que se desarrolla aquí nace de un trabajo realizado para el Proyecto de Superestructura de vía del Tramo Lugaritz-Easo y obra de conexión de Morlans del Metro Donostialdea, gestionado por Euskal Tenbide Sarea (ETS).

El objeto del trabajo ha sido aprovechar dos circunstancias: que la mayor parte del túnel bajo estudio está construida y que existe un túnel en servicio muy similar en el mismo entorno. Gracias a esta casuística, se ha podido establecer un modelo no sólo teórico, sino también ampliamente basado en resultados de mediciones, para predecir las vibraciones y el ruido estructural producido por el paso de material rodante en los túneles.

2. CAMPAÑA DE MEDICIONES

La campaña de mediciones realizadas entre el lunes 29 de noviembre y el viernes 3 de diciembre de 2021 tuvo varios objetivos que se desarrollan a continuación:

- Determinación de los niveles emisión/excitación en túnel con diferentes configuraciones de curvaturas, velocidades, aceleraciones transversales no compensadas, peraltes, frenados y aceleraciones.
- Determinación de la atenuación de las estructuras de túnel y del terreno que las cubre.
- Determinación de la atenuación de los diferentes tipos de terreno.

2.1. Selección de los puntos de medida

Los puntos de medida fueron seleccionados para abarcar los 3 objetivos descritos antes, es decir teniendo en cuenta en emisión las diferentes configuraciones de curvaturas, velocidades, aceleraciones transversales no compensadas, peraltes, frenados y aceleraciones, pero también las diferentes tipologías de túnel (excavado, falso túnel en Morlans y estaciones) y los diferentes terrenos (Maastdaniense, Flysch, cuaternario y combinación de ellos).

Como la mayor parte del tramo Lugaritz-Easo no está en servicio, se realizaron medidas tanto en este túnel que no está en servicio como en otro túnel similar entre Loiola y Altza para poder realizar medidas de emisión y de función de transferencia por estructuras y terrenos, no sólo con excitación por impacto impulsivo (martillo) como en Lugaritz-Easo, sino también con paso de trenes, es decir con una fuente lineal realista. En este otro túnel, el material rodante (Serie 900 de Euskotren) es idéntico al previsto para el tramo Lugaritz-Easo, el sistema de vía también es en placa con sistema Stedef, las estructuras de túnel son muy similares y hasta el diseño de estaciones es el mismo. Se asume que no existen otras medidas antivibratorias como mantas.

Se seleccionaron entonces puntos de medida en ambos túneles de manera que las diferentes configuraciones en emisión y las diferentes tipologías de túnel, de terrenos y de profundidad, sean lo más similares posibles en ambos tramos Loiola-Alza y Lugaritz-Easo.

Únicamente en uno de los puntos, en el túnel de Morlans, sólo se realizaron medidas con paso de trenes en el túnel Lugaritz-Easo, ya que está en servicio y por tanto, para los futuros cálculos, se puede utilizar directamente los resultados de función de transferencia de estructuras y atenuación de terreno.

En los demás puntos, se realizaron medidas de función de transferencia con martillo de impacto en puntos similares en Loiola-Altza y en Lugaritz-Easo y medidas con paso de trenes en Loiola-Altza, para poder tener en cuenta posteriormente en los cálculos la función de transferencia en Lugaritz-Easo con paso de trenes, aunque no se haya podido medir directamente.

2.2. Realización de las medidas

Para las medidas en túneles en servicio, la solera del túnel se instrumentó de noche, se midió con martillo también en horario nocturno y el día siguiente se midió en superficie con paso de trenes y varios acelerómetros a varias distancias para determinar la velocidad de paso. Las medidas sin paso de material rodante en el túnel Lugaritz-Easo se realizaron en horario diurno y en todo caso, se hicieron medidas simultáneas en túnel y en superficie a varias distancias del eje, para determinar atenuaciones de estructuras y terrenos.

A continuación, se muestran unas fotos de estas medidas en túnel y en superficie:

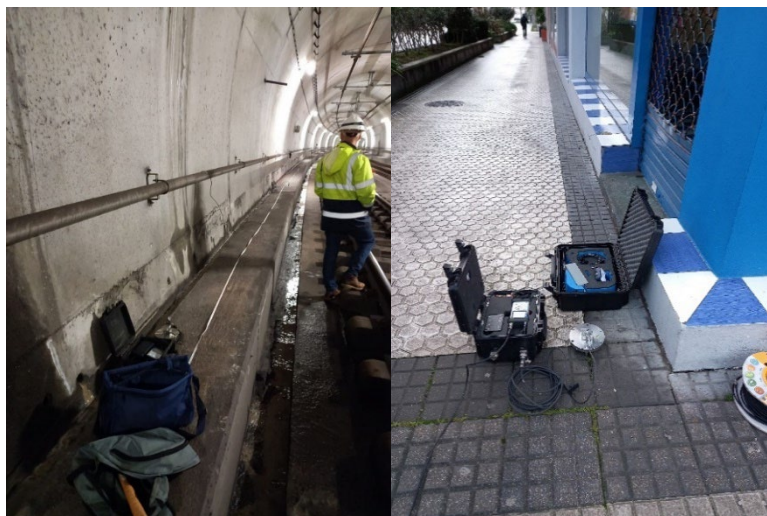


Figura 1 – Fotos de las medidas en túnel y en superficie.

2.3. Resultados en emisión

En cada punto, se determinó inicialmente el nivel medio en cada banda de frecuencia de tercio de octava de todas las circulaciones analizadas y se comprobó que las desviaciones estándares eran razonables en general (en general, del orden de 3 dB, salvo en el túnel de Morlans, 5 dB, y en la estación del Intxaurreondo). Por tanto, en este último caso, situado al final del andén de la estación de Intxaurreondo hacia Herrera, se diferenciaron las circulaciones en un sentido (acelerando) y en otro sentido (frenando). En todo caso, los niveles registrados en estaciones son significativamente más altos que en otras ubicaciones en la mayor parte del rango frecuencial.

La segunda conclusión es que, sorprendentemente, los niveles de emisión en túnel son muy similares en la mayoría de los puntos, es decir independientemente de los radios de curvatura, peraltes, velocidades y aceleraciones transversales no compensadas.

El resultado de este análisis es por tanto el siguiente, después de aplicar correcciones por vibraciones de fondo, en el que destacan 3 grupos:

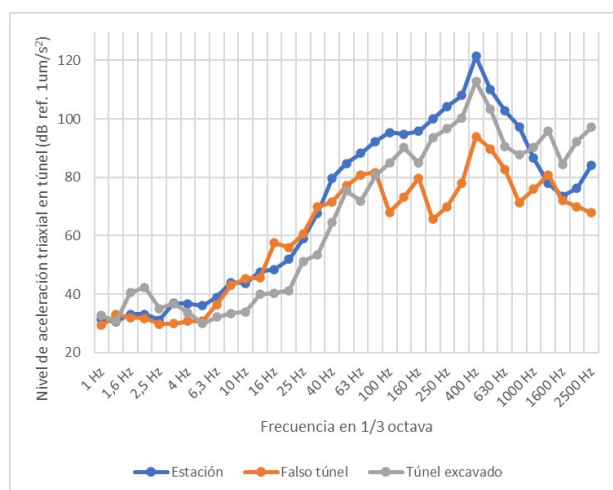


Figura 2 – Resultados de emisión de vibraciones en túnel.

2.4. Resultados de atenuación de estructuras

Para cada ubicación, se determinó la atenuación de las estructuras de los túneles y estaciones, y del terreno de recubrimiento, con martillo y/o con paso de tren, sobre el eje y en el lateral. De ahí, se dedujeron las atenuaciones con paso de tren en el túnel Lugaritz-Easo bajo estudio y se pudieron agrupar de nuevo los resultados en 3 configuraciones:

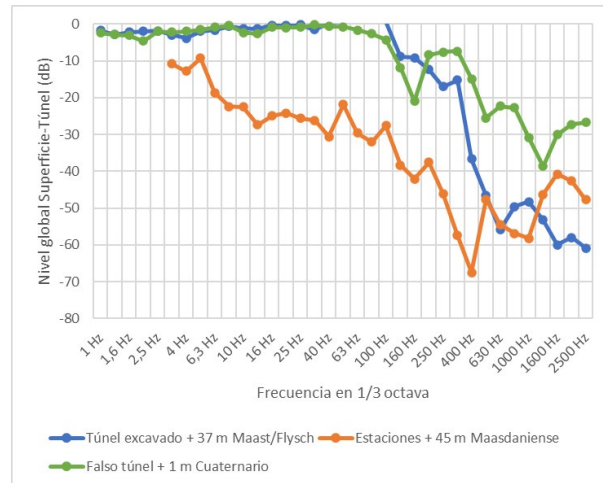


Figura 3 – Resultados de atenuación de estructuras y terrenos.

2.5. Resultados de atenuación de terrenos

Para poder tener en cuenta las diferentes profundidades de túnel a lo largo de todo el trazado, así como las diferentes distancias en planta a la que se encuentran los edificios y los diferentes tipos de terreno, también se determinó la atenuación o transmisibilidad de los terrenos solamente, es decir independientemente de la influencia de las diferentes estructuras de túnel y estación.

Para ello, a partir de las medidas descritas antes y en particular de los resultados obtenidos en los laterales de los túneles en comparación con los resultados obtenidos sobre los ejes, se calculó la atenuación de los terrenos en función de la distancia.

Con estos resultados, para llevar cuenta de las características geotécnicas de cada lugar, se validaron unas curvas teóricas basadas en el modelo ideal de Barkan [1] empleado habitualmente para la caracterización del terreno:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^\gamma e^{\alpha(d_1-d_2)} \quad (1)$$

Donde V_1 y V_2 son las velocidades o aceleraciones de vibración a una distancia d_1 y d_2 de una fuente de vibración, el túnel en este caso, y α y γ unos coeficientes de atenuación que dependen de la características topográficas y geotécnicas de cada lugar.

Con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas y mostrados antes, se procedió entonces a un ajuste empírico. En este caso, se observaron resultados muy similares en terrenos con Flysch y con Maastdaniense, por lo que el ajuste empírico se hizo en primer lugar para dos tipos de terreno: Flysch/Maastdaniense y Cuaternario. Para los sitios donde exista una combinación de ambos tipos, se realizó una interpolación en función del espesor de suelo cuaternario sobre el terreno Flysch/Maastdaniense.

3. MODELO DE PREDICCIÓN

Tal y como se ha comentado antes, los cálculos se basaron en un método analítico basado en una amplia campaña experimental. Para ello, se tuvo en cuenta en los cálculos los diferentes factores relevantes, que en su mayoría se han determinado con las mediciones, y se combinaron para determinar los niveles de ruido y vibraciones previsibles en los edificios cercanos a la traza en el tramo Lugaritz-Easo.

Se utilizaron por tanto los espectros de emisión y de atenuación por estructuras y terrenos mostrados y/o descritos antes.

En cuanto a la transmisión de las vibraciones por los edificios, se utilizó lo indicado en el “Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual” de la Federal Transit Administration (FTA) de los Estados Unidos de América, No. 123, de septiembre de 2018 [2] y es relativamente común, es decir lo siguiente:

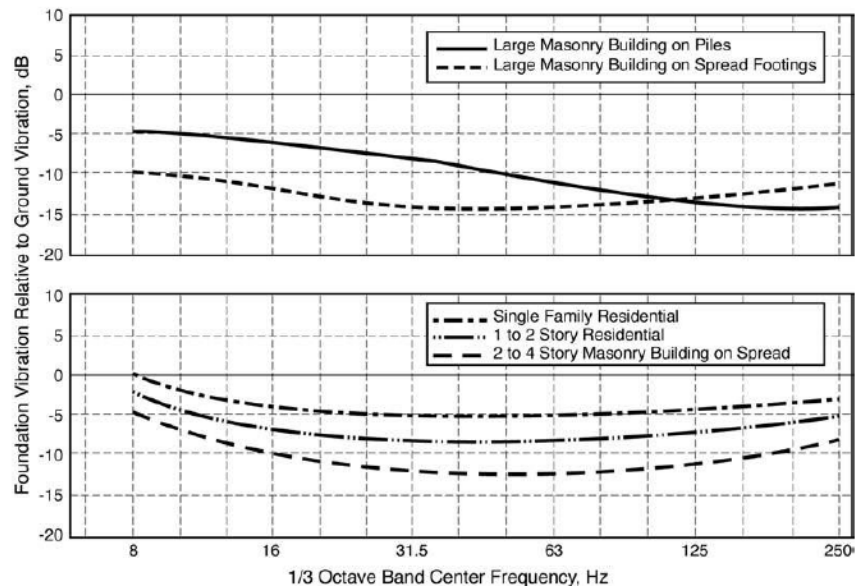


Figure 6-14 Foundation Response for Various Types of Buildings

Figura 4 – Respuesta vibratoria de diferentes tipos de edificios según el manual de la FTA.

Estas gráficas llevan cuenta de la pérdida por acople entre terreno y edificio, pero para considerar toda la contribución de los edificios, también se empleó lo indicado en el manual de la FTA para tener en consideración también las resonancias de los forjados, paredes, techos, etc., es decir, en este caso, una amplificación de 6 dB en las bandas de tercio de octava entre 20 y 31.5 Hz. Los niveles de vibración en edificios se entienden entonces como los niveles previsibles en la estancia con mayor nivel del edificio, generalmente en el centro del forjado más grande de la planta 1.

Finalmente, para la estimación del ruido estructural radiado al interior de los edificios por las vibraciones de los forjados, paredes, techos, etc., también se utilizó lo indicado en el Manual de la FTA, es decir lo siguiente:

$$L_A \approx L_V + K_{A-wt} - 5 \quad (2)$$

Donde L_A es el nivel de ruido ponderado A en banda de 1/3 de octava, L_V el nivel de velocidad de vibración RMS referido a 1 μ pulgada/s en esta banda y K_{A-wt} la ponderación A en esta banda.

El nivel de ruido obtenido es por tanto un nivel máximo ponderado A con el mismo promediado que en las mediciones de vibraciones, es decir exponencial con constante temporal de 1 s (slow). Se trata entonces de un nivel LASmax en el mismo sitio que para vibraciones, es decir en la estancia con mayor nivel de cada edificio, generalmente en el centro de la sala más grande de la planta 1.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Aunque no es el objeto de esta ponencia, a continuación, se resumen los principales resultados obtenidos.

En cuanto a vibraciones, se obtuvieron niveles máximos de Law = 59,4 dB muy inferiores al límite habitual, por ejemplo en el RD 1367/2007, de 72 dB para los edificios más sensibles (sanitarios, docentes y culturales), incluso teniendo en cuenta la desviación estándar máxima observada experimentalmente en emisión de hasta 5 dB.

En cuanto a ruido, se muestra una imagen como ejemplo de resultado, donde los colores dependen de los niveles previstos:



Figura 5 – Niveles de ruido obtenidos en los edificios más cercanos a la traza.

5. CONCLUSIONES

Se ha pretendido mostrar aquí un ejemplo de caso práctico en el que se ha podido establecer un modelo de predicción de vibraciones y ruido ferroviario altamente basado en resultados de vibraciones. Se considera que siempre que sea posible, estos métodos permiten reducir la incertidumbre asociada a modelos totalmente teóricos.

También se han mostrado unos resultados de emisión por material rodante y de atenuación por estructuras de diferentes tipos de túnel y de estación junto con el terreno.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece su ayuda y colaboración a la empresa TYPESA, a Euskal Tenbide Sarea (ETS), al técnico de medida y a los pilotos que nos acompañaron.

REFERENCIAS

- [1] Barkan, D.D. *Dynamics of Bases and Foundations*, New York: McGrawHill Book Company, 1962
- [2] Federal Transit Administration (FTA). *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*, FTA report No. 123, September 2018