

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DEL CARRIL EN LA GENERACIÓN DE VIBRACIONES EN INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS

J. Orta^a, J. Cardona^b, J. Romeu^c, A. Sánchez^c

^a TMB, Ferrocarril Metropolità de Barcelona, SA. Av. Miramar, 20-30. 08038 Barcelona

^b AV Ingenieros. C/ Abat Marcet, 41 Bajos. 08173 Sant Cugat del Vallès

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

jorta@tmb.net

Resumen

Las vibraciones que genera el ferrocarril se deben a cuatro causas básicas: la presión de contacto entre rueda y carril, las rugosidades de la rueda y del carril, la discontinuidad de los apoyos (excitación paramétrica), las singularidades de la vía férrea (juntas o uniones de carril, aparatos de dilatación y cruzamientos). Existe además una quinta causa, denominada *ground vibration boom*, que sólo suele darse con trenes de alta velocidad cuando circulan sobre terrenos blandos.

En este artículo se ha valorado la influencia de la rugosidad del carril sobre el nivel global de vibración, cuantificándose dicha influencia. Para ello, se ha desarrollado un ensayo experimental en el que se ha medido la rugosidad en un tramo de vía antes y después de que ésta fuera sometida a las tareas habituales de mantenimiento, junto con los correspondientes registros de nivel vibratorio en el hastial del túnel, para poder determinar la variación de los niveles vibratorios en función del nivel de rugosidad del carril.

Palabras-clave: rugosidad, vibraciones, ferrocarril.

Abstract

Vibrations that railway generates may be caused by four basic agents: contact pressure wheel-rail, wheel roughness and rail roughness, parametric excitation by supports (sleepers and ties) discontinuity, track singularities (rail joints, expansion joints and crossings). There is another fifth agent, the ground vibration boom, but only happens when high speed trains circulate on soft lands.

This article values and quantifies rail roughness influence on the global level of vibration. An experimental test has been developed to measure roughness and vibratory level on a track section before and after the habitual tasks of maintenance, to determine the variation of vibratory levels as a function of the rail roughness level on the wall of tunnel.

Keywords: roughness, ground-borne vibrations, railway.

1 Introducción

El efecto combinado de las rugosidades de rueda y carril es uno de mecanismos principales de generación de vibraciones [1,2], lo cual exige el mantenimiento periódico de ruedas y carriles con el objeto de mejorar el confort del vehículo y reducir la generación de ruido y vibraciones.

Rueda y carril constituyen un sistema mecánico que está claramente expuesto al desgaste. Ambos componentes se encuentran en contacto mutuo, la rueda describe un movimiento de rodadura (y deslizamiento) sobre el carril y se transmiten esfuerzos de un componente a otro a través del contacto entre ambas superficies. El desgaste comporta la pérdida progresiva de la forma original de los perfiles de rueda y carril a lo largo del tiempo, y el desgaste de vía experimentado es directamente proporcional a las cargas aplicadas sobre la rueda, la velocidad de las circulaciones y al número de pasos de trenes, mientras que las ruedas manifiestan desgaste en proporción a los km recorridos, en condiciones homogéneas de servicio de los trenes.

El desgaste ondulatorio es el modo más habitual de desgaste en redes de ferrocarriles metropolitanos y de cercanías. Se caracteriza por sus marcas observables, que muestran períodos a lo largo del carril y por ello se pueden asociar longitudes de onda. De acuerdo con la ficha (norma) UIC 712, se distingue entre desgaste ondulatorio de onda corta (longitudes de onda, λ , comprendidas entre 3 y 8 cm), y larga (λ entre 8 y 30 cm) [3]. Algunos autores denominan a este último de onda media, puesto que reservan el concepto *onda larga* para $\lambda > 30$ cm [4,5]. El ondulatorio de onda corta se debe a las oscilaciones por deslizamiento de las ruedas durante las fases de tracción y frenado de los trenes [5] y se caracteriza por la presencia de una sucesión pseudo-periódica sobre la superficie de rodadura de crestas brillantes y de valles oscuros. El de onda larga se produce como consecuencia de resonancias entre los movimientos vibratorios de los ejes sobre la vía y la frecuencia vertical propia de ésta [4]; no presenta diferencias de aspecto entre crestas y valles y se caracteriza por desniveles más o menos acentuados de la superficie de rodadura con respecto a un nivel rectilíneo ideal.



Figura 1.- El desgaste ondulatorio de onda corta es característico por la alternancia de manchas brillantes y oscuras

Las consecuencias inmediatas de ambos desgastes son el aumento de la generación de ruido y vibraciones, que alteran el confort del vehículo y transmiten molestias a las construcciones vecinas a la infraestructura ferroviaria. Los carriles sometidos a desgaste ondulatorio deben ser sometidos a mantenimiento periódico. Para ello, Metro de Barcelona utiliza una perfiladora de carril modelo SBM

111 de la firma Plasser & Theurer. Esta operación de mantenimiento, conocida como **reperfilado y esmerilado** consta de dos pasos, el primero de los cuales es un desbaste mediante cuchillas de metal duro para devolver al carril su perfil original (reperfilado); y a continuación, se afina la superficie con muelas abrasivas oscilantes (esmerilado).

2 Desgaste y textura de la superficie

Todo desgaste modifica la rugosidad de las superficies en contacto, es decir, la característica de la textura de toda superficie consistente en presentar pequeñas desviaciones oscilando en torno a una superficie de referencia idealmente lisa.

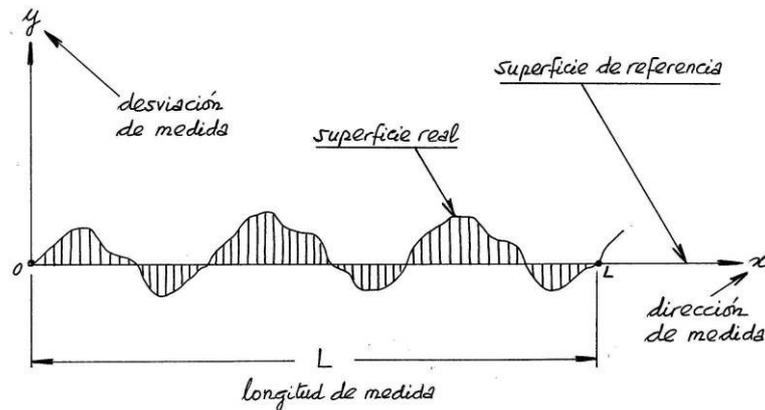


Figura 2.- Concepto de rugosidad.

La norma ISO 4287 expone las diferentes formas de cuantificarla [6], de las cuales ha convenido escoger, para su posterior tratamiento vibratorio, el valor cuadrático medio RMS de la rugosidad:

$$r = R_q = \frac{1}{L} \sqrt{\int_0^L y^2(x) dx} \quad (1)$$

donde $r = R_q$ es la rugosidad cuadrática media (rms), $y(x)$ la desviación medida y L la longitud de referencia tomada. Si el barrido del rugosímetro lo permite, es posible observar la ondulación de la superficie. De no apreciarse a simple vista, la orientación o dirección predominante de la rugosidad puede determinarse modificando la dirección x de medida. A partir del valor r indicado, se puede definir el siguiente *nivel de rugosidad*:

$$L_r = 20 \lg \frac{r}{r_0} \quad (2)$$

tomando como rugosidad de referencia $r_0 = 1 \mu\text{m}$, orden de magnitud del rectificado fino de una pieza.

3 Importancia de la rugosidad en las mediciones

Muchas reclamaciones por inmisión vibratoria o acústica en inmuebles próximos a la infraestructura pueden solucionarse reperfilando los carriles. Su eficacia dependerá del nivel vibratorio que se haya registrado en el domicilio reclamante y del tiempo en que vuelva a degradarse la vía. Por otra parte, están los diferentes ensayos de evaluación de la eficacia antivibratoria de un montaje, del estado de la rodadura de los trenes, del confort de un vehículo o la medida de su emisión sonora. En todos estos casos, la rugosidad distorsiona los resultados numéricos y las conclusiones que puedan extraerse a partir de ellos.

Es necesario acotar la rugosidad en los tramos de vía donde se realizan ensayos, puesto que su presencia es inevitable. Este es el caso de la norma ISO 3095, relativa a la medida de la emisión sonora de los trenes [7]. Pero no siempre las diferentes normas de ensayo hacen referencia a la rugosidad de ruedas y carriles; ni se refieren al efecto de dicho parámetro sobre las condiciones vibroacústicas de diferentes escenarios, especificando las condiciones y procedimientos a seguir para obtener resultados comparables y reproducibles de niveles vibratorios y sonoros provocados por la circulación de los trenes.

4 Generación de vibraciones y ruido

En el contacto rueda-carril, la vibración se genera al entrar en contacto las superficies rugosas de ambos componentes, como puede observarse en la Figura 3. La vibración se transmite mecánicamente al terreno pasando por las traviesas, el balasto (o la placa de hormigón) y la infraestructura; a la vez se genera ruido aéreo o se induce la generación de ruido en otros componentes de la vía. En efecto, es conocido [8] que para frecuencias inferiores a 500 Hz, la mayor contribución al ruido generado por el sistema proviene de las traviesas, que vibran inducidas por el contacto rueda-carril. También es conocido que la rugosidad de las superficies de la rueda y carril es la principal fuente de ruido para velocidades comprendidas entre 60 y 250 km/h, ya que por debajo de 60 km/h la fuente de ruido principal es la propia maquinaria incorporada en el tren, mientras que por encima de 250 km/h la fuente de ruido principal es la componente aerodinámica [9]. El rango comprendido entre estas dos velocidades, que es donde se sitúan las velocidades de la mayor parte de circulaciones que no sean de alta velocidad (tanto en superficie como soterrada), es donde tiene mayor incidencia la rugosidad, por lo que éste se convierte en un parámetro de especial interés.

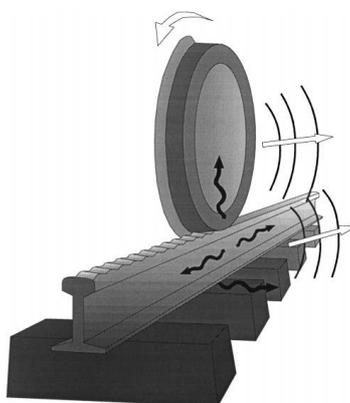


Figura 3. Esquema de la generación de ruido y vibraciones debido a la rugosidad en el contacto rueda-carril.

FUENTE: [10]

5 Relación entre rugosidad y niveles sonoro y vibratorio

El espectro de rugosidad, tanto en bandas de frecuencia como en banda estrecha, se representa mediante la relación amplitud-longitud de onda. La coordenada correspondiente a la longitud de onda puede convertirse a frecuencia para una velocidad de circulación determinada, V , mediante la siguiente relación:

$$f = V/\lambda \quad (3)$$

donde

V es la velocidad de circulación del tren, [m/s]

λ es la longitud de onda, [m]

Partiendo de las ecuaciones (1) y (2), para cada longitud de onda el nivel de rugosidad de una superficie se define como [10,11]:

$$L_r(\lambda) = 20 \cdot \lg \frac{r(\lambda)}{r_0} \quad (4)$$

donde

$r(\lambda)$ es el valor RMS de la amplitud de la rugosidad para una banda de frecuencia de longitud de onda λ .

r_0 es el valor de referencia, 1 μm , comentado anteriormente.

La práctica más habitual es considerar la combinación de las rugosidades de rueda y carril, por lo que se define la **rugosidad combinada**, que es la suma energética de las rugosidades de la rueda y del carril.

$$L_{r,T}(\lambda) = L_{r,w}(\lambda) \oplus L_{r,r}(\lambda) = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{r,w}(\lambda)}{10}} + 10^{\frac{L_{r,r}(\lambda)}{10}} \right) \quad (5)$$

donde

$L_{r,w}(\lambda)$ es el nivel de rugosidad debido a la rueda

$L_{r,r}(\lambda)$ es el nivel de rugosidad debido al carril

\oplus indica suma energética de los valores

Algunos autores han publicado datos experimentales que relacionan el nivel de rugosidad con el nivel sonoro que provocan, obteniendo unos resultados que muestran una relación lineal entre ambos parámetros, tal como se observa en la Figura 4 obtenida de [10]:

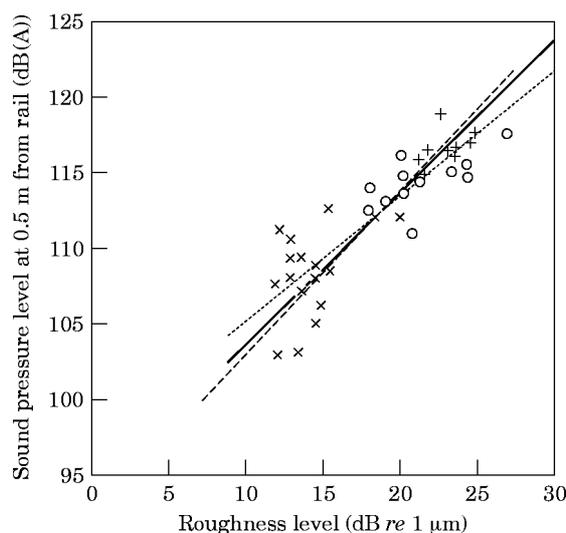


Figura 4. Regresión de los datos experimentales obtenidos en diferentes ensayos, para determinar la relación entre el nivel de rugosidad y el nivel de presión sonora. FUENTE: [10].

En cambio, se ha avanzado menos en el estudio de la relación entre rugosidad y nivel de vibración. Atendiendo la bibliografía consultada, no se observa la existencia de modelo alguno que los relacione. En general, se suele hacer referencia a la eficacia del reperfilado y esmerilado en orden de magnitud, que según Alias es de unos 12 dB [4].

6 Medidas experimentales

La experiencia se ha realizado en un tramo de vía de la red del Metro de Barcelona explotada por TMB y ha consistido en observar rugosidad y nivel vibratorio en hastial (pared del túnel) antes y después de que el carril fuera reperfilado y esmerilado. Para conocer las respectivas rugosidades de carril máximas y mínimas, se escogió expresamente un tramo que, según programa de trabajos, tenía que ser sometido a esta operación de mantenimiento. Conociendo también los niveles de vibración en el hastial del túnel generados por la explotación habitual de la línea antes y después de dichas tareas de mantenimiento, la variación del nivel de vibración podrá ser asociada a la variación del nivel de rugosidad del carril; quedando pendiente de un posterior estudio la evaluación de la influencia de la rugosidad de la rueda sobre la generación de vibraciones así como su influencia en el nivel de rugosidad combinada.

El emplazamiento elegido para el ensayo se halla en la Línea 5, por vía 2, entre las estaciones de Hospital Clínic y Diagonal. El punto de medida se situó a 100 m de la estación de Hospital Clínic, lo que aseguraba que los trenes circularan a la velocidad nominal para este tramo. La Figura 5 muestra el emplazamiento elegido para el ensayo. Este emplazamiento cumple con los siguientes requisitos, necesarios para el buen desarrollo del mismo:

- Carriles en condiciones de máximo desgaste.
- Tener programado en breve su reperfilado y esmerilado.
- Ausencia de traviesas deterioradas, buena clavazón del carril a las traviesas, ausencia de bridas, juntas de carril y aparatos de vía.

- Estar en línea recta, con el objetivo de eliminar cualquier fuente de vibraciones que no fuera la originada por la rugosidad en el contacto rueda-carril, como pudiera ocurrir en circulación en curva.
- Estar en llano o con inclinación mínima, para evitar las distorsiones provocadas por los esfuerzos de tracción y frenado excesivo.
- Estar suficientemente alejada de las estaciones para que la velocidad de paso de los trenes por dicha zona fuera la nominal, pero debía permanecer a una distancia que permitiera colocar el puesto de medida en la estación sin que ello perjudicara a la calidad de la señal debido a una longitud de cable excesiva.



Figura 5. Emplazamiento seleccionado para la medida de rugosidad, L5 del Metro de Barcelona, entre las estaciones de Hospital Clínic y Diagonal.

El tramo de ensayo es de vía doble y se ubica en un túnel constituido por una bóveda de hormigón in situ y contrabóveda de refuerzo, estando la vía está montada sobre balasto, con traviesas de madera y fijaciones rígidas tipo ENSIDESA.

Todos los trenes que circulan por el tramo de ensayo son de la misma serie, tienen una carga máxima por eje de 125 kN y están formados por 5 coches, cuatro motores y un remolque, distribuidos según el esquema M+M+R+M+M, donde M es indicativo de coche motor y R es indicativo de coche remolque.

La rugosidad del carril, parámetro directamente proporcional al estado de mantenimiento del carril, se ha medido antes de cada una de las dos campañas de medida de vibraciones mediante el equipo de medida de rugosidad de rueda y carril TRM02-RRM02 de ØDS, que cumple con los requisitos de las normas internacionales ISO 3095:2005 y ISO 3381:2005.

Dicho equipo está formado por una estructura metálica de una longitud de 1430 mm que se apoya sobre la cabeza del carril. A lo largo de dicha estructura metálica se desliza un carro móvil en el que se disponen tres transductores de desplazamiento que miden la rugosidad a lo largo del carril y en tres trazas de la banda de rodadura del carril, por lo que se determina una rugosidad media de dicha banda de rodadura.



Figura 6. Vista del equipamiento utilizado para la medida de la rugosidad del carril.

Las medidas de vibración, así como las medidas de rugosidad de carril, se realizan en la zona de ensayo marcada en la Figura 5, situada a 100 m del andén de la estación de Hospital Clínic de la L5 del Metro de Barcelona. Para ello, se dispone un acelerómetro en el hastial del túnel, para determinar la componente vertical de la vibración generada por el paso de los trenes por la sección, y el equipo de medida multicanal en el andén de la estación, con el que se registran las señales de vibración generadas por la explotación de la línea, tal como muestra la Figura 7.

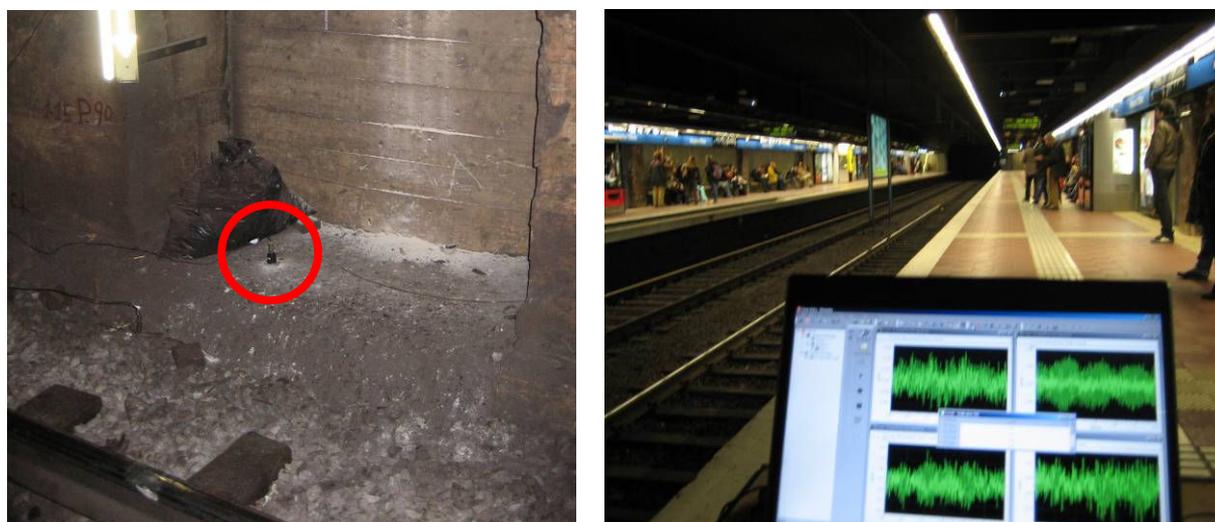


Figura 7. Vista del equipamiento utilizado para la medida de vibraciones al paso de trenes.

7 Resultados obtenidos

Las figuras 8 y 9 muestran los resultados obtenidos de las medidas de rugosidad de carril y de nivel de vibración en hastial de túnel, respectivamente, antes y después de ser reperfiladas y esmeriladas, junto con la curva de referencia indicada en las normas ISO 3095 y 3385 [12,13] que, debido a la inexistencia de documentación más específica, es la que se toma como referencia.

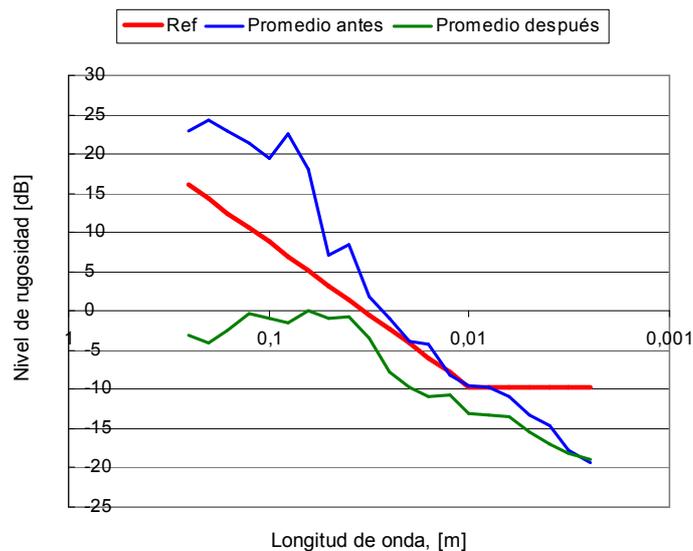


Figura 8. - Rugosidad de carril antes (azul) y después (verde) de las tareas de mantenimiento del carril, respecto a la curva de referencia según ISO 3381:2005 e ISO 3095:2005.

En la Figura 9 se observa la variación del espectro de vibración vertical en el hastial del túnel debido a la reducción de la rugosidad del carril.

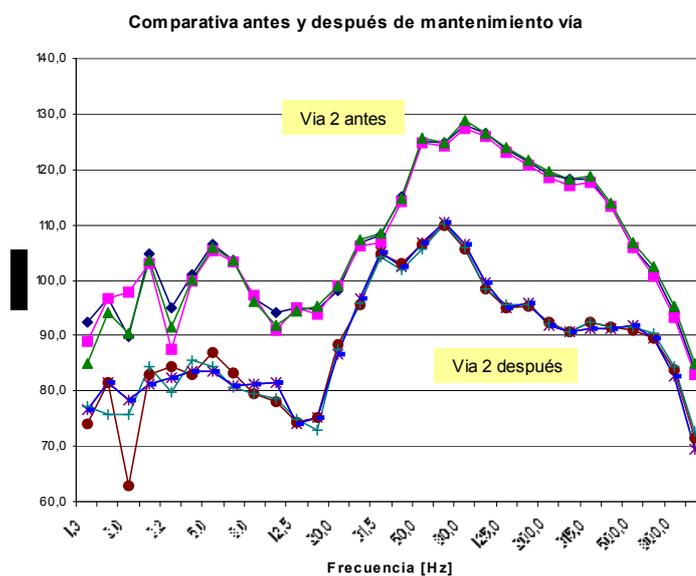


Figura 9.- Niveles de vibración, por tercios de octava, medidos antes y después de las tareas de mantenimiento del carril para diferentes pasos de trenes en servicio.

A la vista de las gráficas de la Figuras 8 y 9, se deducen los siguientes resultados:

- La reducción en valor medio del nivel de velocidad de vibración en hastial, no ponderado, para frecuencias comprendidas entre 1 y 80 Hz se puede cuantificar en 12,4 dB.

- La reducción de los niveles de rugosidad del carril se puede cuantificar en 21,8 dB, calculados según la expresión (1).
- Las tareas de mantenimiento aplicadas al carril, provocan una disminución de sus niveles de rugosidad, especialmente notable en la zona de altas longitudes de onda, pasando a unas condiciones de rugosidad óptimas para el ensayo de trenes según ISO 3095 e ISO 3385.
- La reducción de la rugosidad del carril provoca la reducción de los niveles de vibración, especialmente apreciable para frecuencias superiores a 40 Hz, además de mostrarse homogénea y repetitiva para diferentes registros.

8 Conclusiones

Tras esta experiencia, realizada dentro la red del Metro de Barcelona, que opera TMB, con objeto de comparar rugosidad y nivel vibratorio en hastial antes y después de reperfilear y esmerilar un tramo concreto de vía, atendiendo los gráficos y resultados obtenidos, se exponen las siguientes conclusiones:

1. De la Figura 8, se observa que el tramo de vía escogido presentaba un apreciable nivel de desgaste ondulatorio, preferentemente de onda media, a partir de 8 cm de longitud de onda, que coincide con el aspecto visual que ofrecían los carriles la fecha del primer ensayo.
2. La rugosidad de los carriles ha quedado reducida al mínimo (1 μm), después de la operación de mantenimiento indicada.
3. La variación del nivel de vibración observado con el descenso de la rugosidad del carril concuerda 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 [4, 14, 15]. Debe advertirse que el valor obtenido no es aplicable en situaciones de inmisión vibratoria en el interior de edificios, ya que se trata de un nivel de velocidad de vibración no ponderado.
4. El espectro de vibración de la Figura 9 confirma las experiencias de la RATP y Eisenmann, indicando la existencia de un máximo resonante situado entre 40 y 80 Hz para la vía sobre balasto montada sobre fijaciones rígidas [15], más notable en el caso de vía reperfileada y esmerilada.
5. Hay que tener presente que la resonancia del conjunto de los componentes de la vía puede ensombrecer la eficacia del reperfileado en alguna banda de frecuencia.
6. Atendiendo los resultados obtenidos, la curva de rugosidad – longitud de onda de las normas ISO 3095 e ISO 3385, es una pauta generosa para establecer condiciones de rugosidad óptimas para la circulación de trenes en los ensayos vibratorios, mientras no se disponga de gráficos similares en normas más específicas.

Agradecimientos

A Transports Metropolitans de Barcelona (TMB), gracias a quien ha sido posible ejecutar la fase experimental de este trabajo.

Al Ministerio de Fomento, por su financiación a través de las ayudas a la investigación según convocatoria de I+D Transportes – 2005, que posibilitaron al LEAM la adquisición de la instrumentación necesaria para el presente estudio.

Referencias

- [1] V.V. Krylov. Generation of ground vibrations by superfast trains. *Applied Acoustics*, 1995, 44, 149-164.
- [2] M. Hussein. *Vibration from underground railways*. PhD Thesis, University of Cambridge, 2004.
- [3] Ficha UIC 712, *Defectos de carril*, 4ª ed. 2002
- [4] Alias, J. Valdés, *La vía del ferrocarril*. Librería editorial Bellisco, 1ª ed., Madrid, 1990
- [5] Inwicki, S., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press, Boca Raton (FL), 2006.
- [6] UNE EN ISO 4287:1999, Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial.
- [7] UNE EN ISO 3095:2006, *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Medición del ruido por vehículos que circulan sobre carriles*.
- [8] A. Johansson. Out-of-round railways wheel – assessment of wheel tread irregularities in train traffic. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293, 795-806.
- [9] R.J. Diehl, P. Holm. Roughness measurements-Have the necessities changed?. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293, 777-783.
- [10] 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.
- [11] M.H.A. Janssens, M.G. Dittrich, F.G. de Beer, C.J.C. Jones. Railway noise measurements method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293, 1007-1028.
- [12] ISO 3095:2005. Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles.
- [13] ISO 3381:2005. Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles.
- [14] Kaynia, A.M. Measurements and prediction of ground vibration from railway traffic. *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 3, 2001, 2105-2109.
- [15] Eisenmann, Josef, *La superestructura en ferrocarriles urbanos y metros teniendo en cuenta especialmente la emisión de ruidos provocados por los cuerpos sólidos*. Revista A.I.T., 56, julio-agosto 1984