

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE BARRERAS ACÚSTICAS PARA RUIDO FERROVIARIO EN LA OCTAVA DE 630 Hz MEDIANTE ELEMENTOS DE CONTORNO

J. I. Linares y D. Gil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería – ICAI, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, c/ Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, España, linares@upco.es

RESUMEN: En anteriores trabajos se ha analizado la validez del Método de los Elementos de Contorno para el problema de la evaluación de las pérdidas por inserción debidas a barreras acústicas en aplicaciones ferroviarias. Hasta el momento el estudio se ha llevado a cabo a una única frecuencia, obteniéndose resultados llamativos. En particular se observa que el comportamiento de la barrera resulta perjudicial con suelos tipo hierba ($\sigma = 200 \text{ kN-s/m}^4$), y que por el contrario es extraordinario al emplear una cumbrera en forma de T “sintonizada” con la distancia al tren.

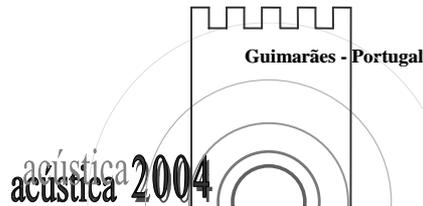
Se hacía preciso ampliar el estudio a banda ancha, con objeto de valorar la validez de los resultados anteriores en condiciones de ruido real, que dista mucho de ser monocromático. En este artículo se presentan los resultados de evaluar en una banda de 1 octava los comportamientos anteriores, es decir, la influencia del suelo y la sintonización de la cumbrera. De ellos se deriva que la banda ancha matiza las conclusiones obtenidas en análisis monocromáticos, pero no las distorsiona gravemente, lo cual permite ahorrar esfuerzos computacionales en los estudios previos.

ABSTRACT: In previous works the suitability of Boundary Element Method for evaluation of insertion losses by acoustical barriers in railway applications has been analyzed. Those studies had been madden at a unique frequency, giving excellent results. So, it was possible to verify that the behavior of the barrier with grass type ground ($\sigma = 200 \text{ kN-s/m}^4$) was very bad and in the other hand it was successfully to use T shape barriers tuned with the distance to train.

It was necessary to research the behavior in wide band in order to evaluate the accuracy of the previous results in actual noise conditions, which are far from pure tone. This paper shows the results of evaluate the performance of barriers in previous circumstances (grass ground and T shape) with a 1 octave band noise. It's possible to extract from these ones that wide band character shades the conclusions obtained with narrow band noise, but it doesn't distortion very much, which allows shaving computational efforts in previous studies.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo del Método de los Elementos de Contorno (MEC) ha resultado muy potente [1, 2, 3] para evaluar el comportamiento de barreras acústicas para tráfico ferroviario, pues permite un acercamiento a la realidad mucho mayor que con las técnicas clásicas de rayos. Sin embargo el MEC presenta el inconveniente de consumir grandes recursos computacionales a



frecuencias elevadas, precisando además ejecutar de forma completa los casos cuando se cambia la frecuencia (existen algunos trabajos de interpolación en frecuencias [4], pero no contemplan ni la geometría 2D ni las situaciones reales de diversas impedancias).

Esto hace que, al menos en estudios previos, sea conveniente llevar a cabo simulaciones con fuentes monocromáticas, eligiendo la frecuencia como representativa dentro del espectro del ruido ferroviario. Así se hizo en Linares and Gil [3], tomando la frecuencia de 630 Hz, que resulta adecuada para modelar el ruido de rodadura y de tracción [5]. El objetivo del trabajo aquí presentado es valorar hasta que punto son fiables las conclusiones obtenidas en aquel estudio al considerar la fuente de banda ancha (1 octava centrada en 630 Hz).

La formulación empleada del MEC ha sido la misma que en [3], recurriendo a los códigos 2D con elementos constantes desarrollados por Domínguez [6], modificados para incluir como condición de contorno la impedancia acústica [7]. El suelo se ha considerado de extensión finita en lugar de recurrir a la función de Green para semiespacios infinitos. De esta manera se evitan los problemas típicos de las frecuencias irregulares.

2. CONFIGURACIONES ANALIZADAS

Se ha empleado un modelo 2D debido a las longitudes habituales de las composiciones ferroviarias. La fuente es un monopolo lineal coherente próxima a los raíles pero no bajo el coche (0,75 m sobre el suelo y 2,5 m en horizontal desde el plano medio vertical del coche). Esta posición ha sido empleada por otros autores [8,9] debido a que de forma sencilla es capaz de reproducir adecuadamente el ruido de rodadura y tracción. Aunque es conocido que el patrón dado por una fuente tipo dipolo modela mejor el ruido producido por el ferrocarril, la diferencia con el patrón dado por la fuente tipo monopolo sólo es perceptible cuando la altura de la barrera se incrementa [5]. Para la altura de barrera empleada en este artículo (3 m) el monopolo es suficientemente representativo.

En cuanto a la geometría del problema estudiado, aparece representada en la figura 1. Se ha considerado un balasto de sección trapezoidal, con 5 m de ancho en la base, 3 m en la cumbre y 0,5 m de altura. El suelo a la izquierda del balasto (parte no analizada) se ha extendido 5 m, lo que resulta suficiente para la frecuencia considerada de 630 Hz. La sección del coche es de 3 m x 3 m, centrada en el balasto y a 0,5 m desde su terminación. Se han estudiado diferentes posiciones de la barrera, estando todas ellas comprendidas entre 0,6 y 2,5 m desde la base del balasto (P en la figura 1). El campo acústico se ha evaluado en una región que se extiende 100 m a la derecha de la barrera y 50 m sobre el suelo.

Se han analizado dos tipos de barrera, la llamada lisa y la de cumbrera en T. En ambos casos la altura ha sido de 3 m y el espesor de 10 cm (H y e en la figura 2). Parte de la superficie de la barrera ha sido recubierta por material absorbente, distinguiéndose los tres casos mostrados en la figura 2.

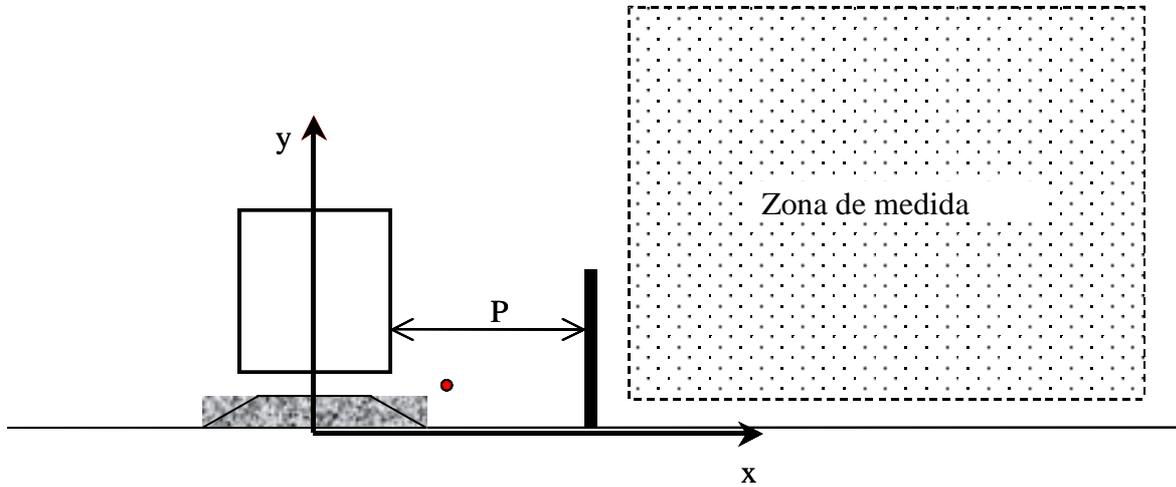


Figura 1 – Geometría empleada en las simulaciones. La barrera representada se corresponde con el caso liso.

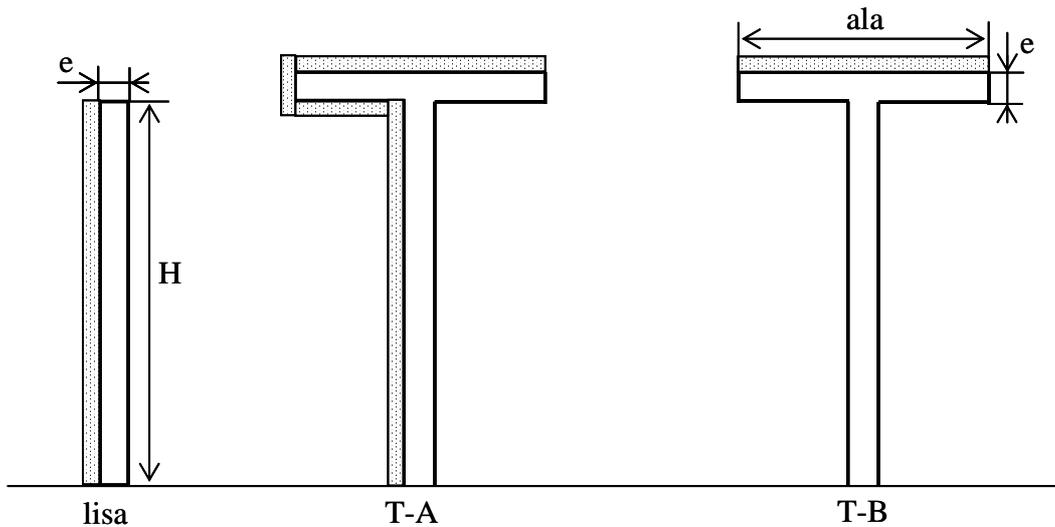
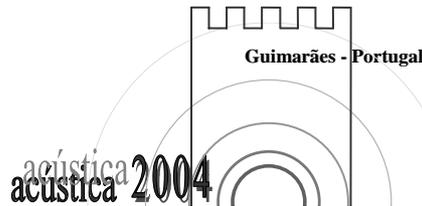


Figura 2 – Tipología de barreras analizadas, con indicación de la superficie tratada con material absorbente.

3. MODELO DE IMPEDANCIAS

Se ha empleado un modelo de impedancia localmente reactivo, viniendo dada la impedancia acústica por la ecuación de Delany-Bazley [10]:

$$\frac{Z_{\infty}}{z_0} = \left\{ 1 + 9,08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} \right\} - j11,9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \quad (1)$$



donde Z_{∞} representa la impedancia acústica de una capa de material de espesor infinito con una terminación rígida; z_0 la impedancia acústica específica del aire; f la frecuencia en Hz y σ la resistividad de flujo en kN-s/m^4 . Si el espesor de la capa es finito (L) la ecuación (1) se modifica, pasando a ser:

$$Z = Z_{\infty} \cot gh [kL] \quad ; \quad \frac{k}{k_0} = 10,3 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,59} + j \left\{ 1 + 10,8 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,7} \right\} \quad (2)$$

donde k_0 es el número de onda del aire.

La tabla 1 muestra los valores de la resistividad de flujo empleados en las diferentes superficies. Los valores de las superficies absorbentes se corresponden con una lana mineral típica, los del balasto se han tomado de Jean [8], los del suelo duro (600 kN-s/m^4) se corresponden con una cuneta sucia con guijarros y los del blando (200 kN-s/m^4) con un suelo de hierba [11].

Tabla 1 – Valores de resistividad de flujo empleados en las simulaciones

	Suelo duro		Suelo blando	
	σ [kN-s/m^4]	L [cm]	σ [kN-s/m^4]	L [cm]
Suelo	600	∞	200	∞
Balasto	100	50	100	50
coche	∞	---	∞	---
absorbente barrera	30	5	30	5
barrera desnuda	∞	---	∞	---

4. COMPOSICIÓN DE FRECUENCIAS

El estudio en banda ancha se ha efectuado considerando las frecuencias constituyentes de una octava con una resolución de 1/16, lo que da 17 frecuencias analizadas. La frecuencia central ha sido 630 Hz, que es la empleada en el estudio monocromático que sirve de base a este artículo [3].

Con objeto de no penalizar excesivamente el peso de la frecuencia central se ha ponderado la intensidad acústica correspondiente a cada frecuencia constituyente de la banda mediante una distribución normal con media 630 Hz y de desviación típica 2,496 Hz, de manera que el nivel de intensidad acústica total viene dado por:

$$L_1 = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^{i=17} w_i I_i \right) - 120 \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

donde I_i representa la intensidad acústica a la frecuencia i -ésima (re 1 pW/m^2) y w_i el peso correspondiente a dicha frecuencia.

5. RESULTADOS

5.1 Barrera lisa

El estudio llevado a cabo en [3] indica que con suelos “blandos” es perjudicial colocar barrera, pues ésta modifica el campo acústico introduciendo nuevas reflexiones que incrementan el nivel de presión sonora. El hecho de que la fuente sea de banda ancha no invalida este hecho, como se comprueba en la figura 3 donde se aprecia una gran similitud entre las pérdidas por inserción en el caso de fuente monocromática y de banda ancha, resultando negativo en ambos casos el índice de calidad acústico [12] (amplificación del ruido de 10 dB).

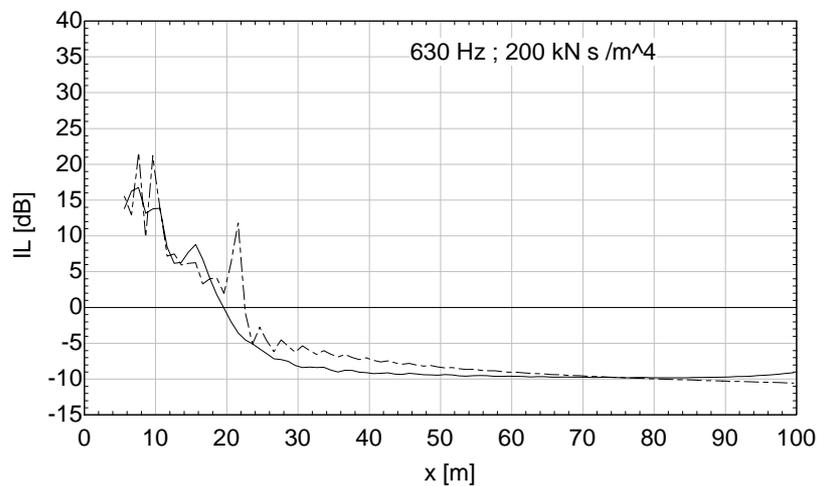


Figura 3 – Pérdidas por inserción a $y = 1,5$ m con suelo blando. En línea continua se muestra el resultado en banda ancha y en discontinua en monocromática.

Donde la influencia de la banda ancha se hace más patente es en la validez de los estudios paramétricos. Así, se había encontrado [3] que en la configuración estudiada con barrera plana la mejor distancia de colocación de ésta era para $P = 2,5$ m (figura 1). Sin embargo, las simulaciones llevadas a cabo en banda ancha no son tan determinantes, como se ilustra en la tabla 2. En efecto, cuando se emplea banda ancha apenas hay diferencia entre ubicar la barrera a 1,25 m del balasto o a 2,5 m, si bien el perfil de pérdidas es más uniforme a 2,5 m.

Tabla 2 – Influencia del ancho de banda en los resultados de un estudio paramétrico para hallar la mejor “P” en barrera lisa. Evaluación hecha a $y = 1,5$ m

	monocromática		banda ancha	
	P = 1,25 m	P = 2,5 m	P = 1,25 m	P = 2,5 m
Índice calidad [dB]	6,25	18,63	13,25	14,53

5.2 Barrera en T

Se ha analizado la mejor manera de recubrir con material absorbente la barrera provista de cumbre mediante simulaciones con los casos T-A y T-B (figura 2), poniéndose de nuevo de manifiesto la necesidad de llevar a cabo estudios en banda ancha. Así, las figuras 4 y 5

muestran sin lugar a dudas que es más eficiente la configuración T-B que la T-A si se considera ruido monocromático. Sin embargo, ante fuentes de banda ancha ambas configuraciones son similares, presentando los patrones de pérdidas mayor uniformidad.

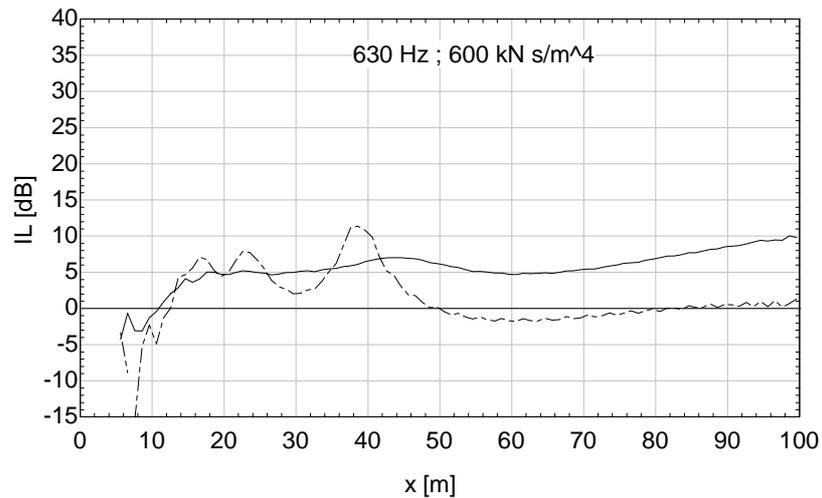


Figura 4 – Pérdidas por inserción a $y = 1,5$ m con barrera en T recubierta de forma A. En línea continua se muestra el resultado en banda ancha y en discontinua en monocromática.

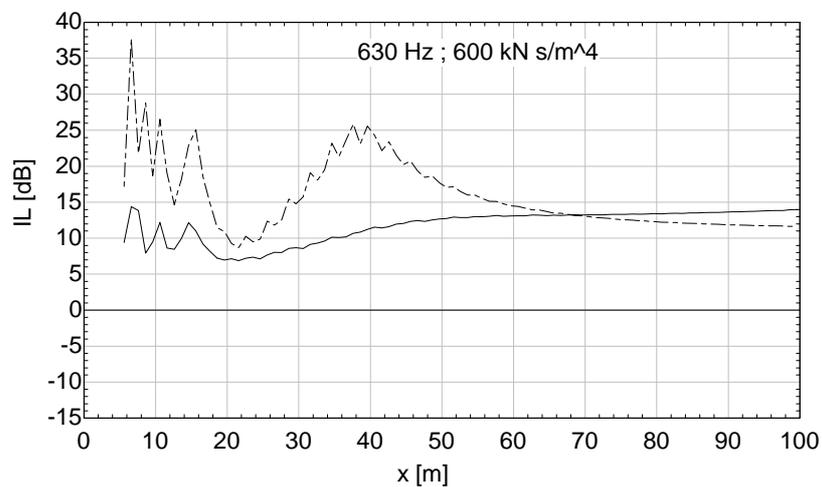


Figura 5 – Pérdidas por inserción a $y = 1,5$ m con barrera en T recubierta de forma B. En línea continua se muestra el resultado en banda ancha y en discontinua en monocromática.

Linares y Gil [3] demostraron que las barreras con cumbreras en forma de T permiten obtener una elevada eficiencia debido a que es posible ajustar su posición (parámetro P) y tamaño (ala de la cumbrera) para crear un campo acústico interior capaz de comportarse a modo de resonador de Helmholtz. Evidentemente esta sintonía pierde su eficacia al considerar la fuente de banda ancha, pues los efectos resonantes quedan reducidos. Para comprobar hasta qué punto se ve pierde eficiencia al considerar la fuente como de banda ancha se ha llevado a cabo

un estudio paramétrico con fuente monocromática en el que se ha maximizado el índice de calidad acústica [12] en función del ala de la cumbrera y de la distancia al balasto. Así se ha obtenido un índice de 29 dB para $P = 1,4$ m y ala de 1,8 m, tal y como se muestra en la figura 6. En la misma figura aparecen las pérdidas obtenidas al considerar la fuente de banda ancha, apreciándose una pérdida de eficacia importante (el índice de calidad pasa a ser de 14 dB), contrarrestada con una mayor uniformidad.

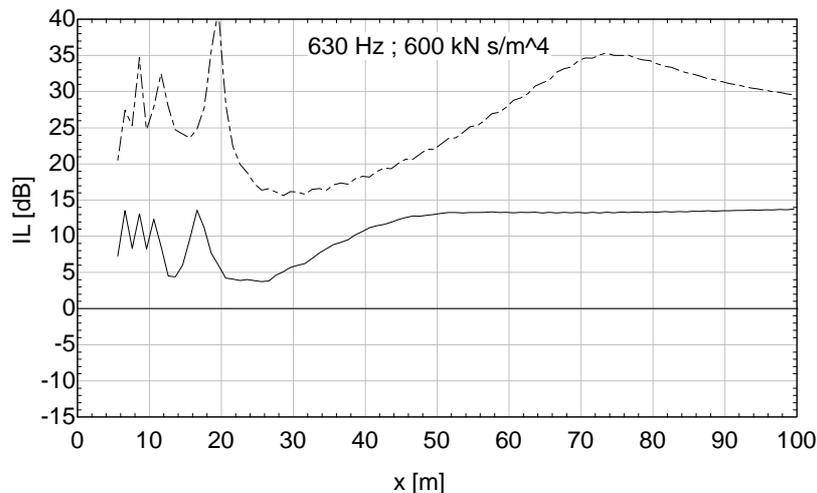
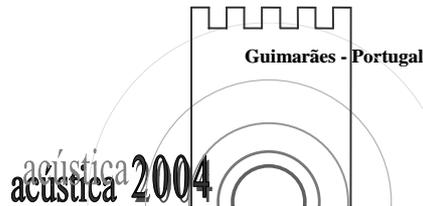


Figura 6 – Pérdidas por inserción a $y = 1,5$ m con barrera tipo T-B y sintonizada para 630 Hz. La distancia al balasto (P) es de 1,4 m y el ala de 1,8 m. En línea continua se muestra el resultado en banda ancha y en discontinua en monocromática.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la consideración de ruido de banda ancha no anula totalmente las conclusiones obtenidas con ruido monocromático, sino que simplemente las matiza, lo cual permite hacer análisis previos monocromáticos esperando una aceptable precisión en la extrapolación de sus resultados a banda ancha. Así se ha visto que la inclusión de una barrera lisa cuando el suelo es blando resulta perjudicial independientemente del contenido espectral de la fuente.

El comportamiento general observado al considerar la fuente de banda ancha es que los perfiles de pérdidas por inserción se suavizan, alcanzándose la región asintótica del índice de calidad acústica [12] a distancias menores. Esta suavidad, unida al hecho de que la banda ancha atempera los efectos de las resonancias, provoca los espectaculares resultados obtenidos en estudios paramétricos en los que se maximizan las pérdidas buscando un comportamiento de resonador a partir de fuentes monocromáticas resulten muy matizados, perdiéndose la sensibilidad ante pequeñas variaciones entre los parámetros.



7. REFERENCIAS

- [1] J. I. Linares y D. Gil; *Evaluación de las pérdidas por inserción en barreras acústicas rígidas semiinfinitas mediante el método de los elementos de contorno*. Revista de Acústica, 31, 2000
- [2] J. I. Linares y D. Gil; *Consideración del suelo en el modelado de barreras acústicas bidimensionales mediante el método de los elementos de contorno*. Revista de Acústica, 32, 2001
- [3] J. I. Linares and D. Gil; *Evaluation of insertion losses of acoustic barriers in railways by the boundary element method*. Revista de Acústica, 33, 2002
- [4] T. W. Wu, W. L. Li and A. F. Seybert; An efficient boundary element algorithm for multi-frequency acoustical analysis. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 94, pp. 447-452, 1993
- [5] P. A. Morgan, D. C. Hothersall and S. N. Chandler-Wilde; *Influence of shape and absorbing surface-a numerical study of railway noise barriers*. Journal of Sound and Vibration, 217, 405-417, 1998
- [6] J. Domínguez; *Boundary elements in dynamics*. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1993.
- [7] J. I. Linares y D. Gil; *Aplicación del método de los elementos de contorno a barreras acústicas*. En Actas del V Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, España, Junio 2002.
- [8] P. Jean; *A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise*. Journal of Sound and Vibration, 212, 275-294, 1998
- [9] D. C. Hothersall, S. A. Tomilson; *Effects of high-sided vehicles on the performance of noise barriers*. Journal of Acoustical Society of America, 102, 998-1003, 1997
- [10] M. E. Delany and E. N. Bazley; *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics, 3, 105-116, 1970
- [11] T. F. W. Embleton, J. E. Piercy and G. A. Daigle; *Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements*. Journal of Acoustical Society of America, 74, 1239-1244, 1983
- [12] F. Simón y J. Pfretzschner; *Índice de calidad acústica de barreras antirruido*. Anales de Física, Vol. 95, pp. 64-73, 2000