

Aplicación del MEC en la evaluación de medidas para reducir el impacto acústico en el entorno de carreteras

F. Perdomo, J. Aznárez, O. Maeso
Inst. Univ. de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI)
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus Universitario de Tafira, 35017
e-mail: maeso@cicei.ulpgc.es

PACS: 43.28.Js, 43.50.Gf

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo bidimensional de Elementos de Contorno que permite determinar la eficacia de medidas de reducción del impacto acústico provocado por el tráfico rodado. Se presentarán resultados de eficacia para estrategias que implican el apantallamiento de la fuente de ruido (pantallas acústicas y depresión de vías). La capacidad absorbente de las superficies de las pantallas es tenida en cuenta a través de un modelo sencillo. La capacidad absorbente del terreno también es considerada.

Summary

In this work a two-dimensional Boundary Element model to compute the efficiency of roadside noise abatement measures is presented. Results of sound insertion loss (noise barriers and roads in cutting) are presented. The absorption capacity of barrier boundaries is taking into account using a simple model. The effects of the ground cover are also considered.

Introducción

En relación con el estudio de medidas anti-ruido existen multitud de modelos analíticos y experimentales que han mostrado su eficacia durante mucho tiempo, si bien con el desarrollo que en los últimos años han experimentado los ordenadores, se ha abierto un campo interesante en relación con el estudio de problemas de acústica haciendo uso de mé-

todos numéricos. De entre los que requieren un proceso de discretización los más empleados son el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de los Elementos de Contorno (MEC). El MEF es más adecuado en problemas de acústica de interiores para todo lo que tiene que ver con la obtención de las frecuencias propias de recintos, sin embargo presenta dificultades importantes para abordar problemas en dominios no acotados como en el caso de la acústica ambiental. Para problemas dinámicos en medios infinitos el MEC presenta importantes ventajas que lo hacen más adecuado: Sólo requiere discretizar el contorno del problema y la formulación cumple las condiciones de radiación en el infinito de forma implícita. Con este Método ya se han desarrollado algunos trabajos en el campo de la acústica ambiental si bien continua siendo un tema abierto.

En lo que se refiere a las medidas para disminuir el impacto acústico en el entorno de carreteras, la colocación de barreras acústicas entre la fuente y el receptor constituyen uno de los procedimientos más habituales. La inclusión de estos elementos interfiere el recorrido normal de la propagación creando una zona de sombra del lado puesto al emisor donde los niveles sonoros serán inferiores respecto de la situación en la que no exista barrera. En el trabajo que se presenta, se analiza la eficiencia de estas medidas y otras similares como la depresión de vías haciendo uso de un modelo numérico basado en el MEC propuesto por Maeso y Aznárez [1] y Chirino et al. [2].

Haciendo una modesta revisión de los trabajos realizados en el campo del estudio acústico de pantallas haciendo

uso del MEC debemos comenzar por referir la aportación realizada por Sez nec [3] que es reconocido por muchos autores como el primer investigador que analiza el comportamiento acústico de barreras sobre terreno absorbente haciendo uso de este Método. Más recientemente, son destacables los trabajos realizados en este campo por Hothersall y colaboradores haciendo uso de modelos bidimensionales. De entre las publicaciones realizadas por estos autores cabe mencionar aquellas vinculadas al estudio de la eficiencia de pantallas individuales, [4] y [5], que recogen espectros de pérdida por inserción para geometrías diferentes, así como las relativas a configuraciones con múltiples pantallas entre fuente y receptor [6]. También es destacable la labor realizada por Antes y colaboradores es el análisis de configuraciones 2-D y 3-D con barreras de diferente tipología y fuentes en movimiento [7] aplicando el MEC. Por último referir a Watts [8] que establece una validación muy satisfactoria de los resultados obtenidos mediante este Método con modelos experimentales.

En España, la investigación vinculada con problemas de acústica tiene un desarrollo importante en los últimos años. Así, y relacionado con el problema que nos ocupa, pueden referirse muchas publicaciones de interés que hacen uso de las metodologías mencionadas (ver p.e. [9] y [10]).

Hipótesis de partida

La adopción de un modelo bidimensional para el estudio del problema supone, en el caso del tráfico rodado, una calzada recta y unas condiciones de tráfico denso y continuo de manera que el campo de presiones es idéntico en cualquier plano perpendicular a la vía. De este modelo simplificado pueden obtenerse conclusiones interesantes en lo que a parámetros de eficiencia de medidas anti-ruido se refiere. La consideración de la realidad tridimensional del problema no supone dificultad conceptual añadida pero si importantes inconvenientes desde el punto de vista computacional.

El análisis requiere caracterizar las tres componentes implicadas. El emisor será representado por una fuente puntual armónica vibrando en la frecuencia central de cada tercio de octava. Ésta es la imagen bidimensional de una línea pulsante en el problema 3-D. El aire se modela de la forma habitual como un medio homogéneo, isótropo, elástico y compresible con viscosidad despreciable y comportamiento lineal que trabaja en un rango de pequeñas perturbaciones. Los contornos del modelo (G) se caracterizan por su geometría y por la mayor o menor capacidad para absorber la energía que incide en ellos. Esto último dependerá de los materiales que los conforman y del tratamiento de sus superficies.

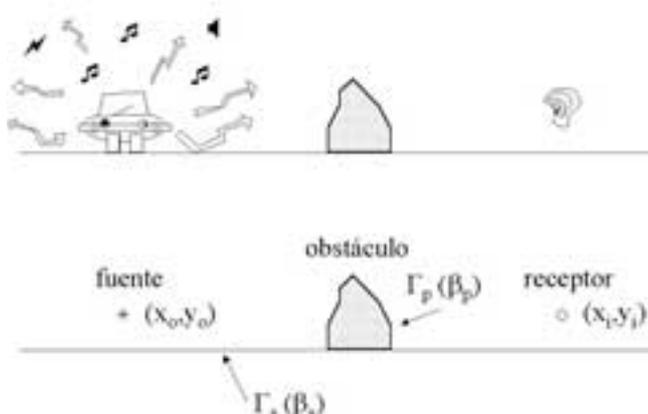


Figura 1. Representación modelo bidimensional.

Así, cuando pretendemos determinar la eficiencia de barreras acústicas, el modelo utilizado es el representado en la figura 1. El emisor será una fuente puntual armónica caracterizada por su frecuencia de emisión y los contornos de dos tipos fundamentalmente: De un lado aquellos que constituyen las superficies del obstáculo (Γ_p) con capacidad para absorber energía según su admitancia (β_p), y de otra parte el que determina la superficie del terreno o contorno del semiespacio (Γ_s) también con capacidad absorbente (β_s).

Ecuaciones básicas

La ecuación de partida del MEC en problemas escalares como el que nos ocupa lo constituye la representación integral extendida a los contornos del obstáculo cuya eficacia se analiza y que relaciona dos soluciones de la ecuación de onda. Así:

$$c_i p_i + \int_{\Gamma_p} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma_p = p_o^* + \int_{\Gamma_p} p^* \frac{\partial p}{\partial n} d\Gamma_p \quad (1)$$

donde p representa el campo de presiones en el contorno del obstáculo (Γ_p) para el problema real y p^* la solución fundamental correspondiente al campo de presiones provocado por una fuente localizada en el punto i del contorno pulsando a la misma frecuencia para un problema que sólo considera el semiespacio delimitado por el contorno del terreno (G_s) de admitancia dato (β_s) (la solución en presiones de este problema virtual es perfectamente conocida). Por lo demás n representa un vector unitario normal al contorno en cada punto y c_i un término que depende de la geometría local del punto i donde la fuente es aplicada en el problema virtual. p_o^* es el valor de la presión provocada por la fuente virtual en el punto geométrico donde se localiza la fuente en el problema real (x_o, y_o).

La resolución de (1) de forma numérica pasa por discretizar el contorno del obstáculo en elementos cada uno de

ellos definido por una serie de nodos que sirven de soporte para la aproximación de la variable. Para el modelo desarrollado, el grado de aproximación utilizado es de orden dos (elementos parabólicos). Así cada elemento está determinado por tres nodos y la variable de campo dentro de cada elemento (j) podrá escribirse en función de los valores que adopta en éstos a través de funciones de interpolación de la forma que sigue:

$$p^j = \phi_1 p_1^j + \phi_2 p_2^j + \phi_3 p_3^j \quad (2)$$

Introducida esta aproximación de la variable en (1), podemos escribir:

$$c_i p_i + \sum_{j=1}^{NE} \sum_{k=1}^3 h_k^{ij} p_k^j = p_o^* + \sum_{j=1}^{NE} \sum_{k=1}^3 g_k^{ij} \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right)_k \quad (3)$$

donde NE es el número total de elementos en que se discretiza el obstáculo, siendo:

$$h_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial p^*}{\partial n} \phi_k d\Gamma_j \quad g_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} p^* \phi_k d\Gamma_j \quad (4)$$

integrales extendidas a cada elemento. En Domínguez [11] puede verse el procedimiento para la evaluación numérica de estas integrales así como otros muchos aspectos metodológicos relativos a la utilización del MEC en problemas dinámicos. La aplicación reiterada de (3) colocando la fuente virtual en todos los nodos de la discretización (Γ_p), reduce el problema a la resolución de un sistema de ecuaciones algebraico (5) donde las incógnitas son el valor de las variables en los nodos (presión y/o flujo).

$$[H] \{p\} = [G] \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \right\} \quad (5)$$

La imposición de condiciones de contorno sobre (5) se establecen a través de la capacidad absorbente de los mismos. Matemáticamente esta condición se expresa desde el problema de propagación monodimensional mediante una relación entre la presión y el flujo a través de la admitancia (b):

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -j k \beta p \quad (6)$$

siendo j la unidad imaginaria y k el número de onda. Si el contorno es completamente reflejante $\beta=0$. Valores empíricos de β para materiales porosos puede obtenerse desde el modelo de Delaney y Bazley [12] en función de la permeabilidad (su inversa σ).

Validación experimental

Dentro de este epígrafe quedará demostrada la buena aptitud del modelo de elementos de contorno desarrollado para el problema de acústica exterior. Así, como en [4], se han contrastado sus resultados con algunas medidas experimentales para el problema mostrado en la figura 2a [13]. Se trata de obtener los niveles de intensidad en un receptor situado tras un obstáculo de forma cuadrada que se encuentra sobre un contorno plano con cierta capacidad absorbente ($\sigma = 250.000 \text{ Nsm}^{-4}$). Las medidas se realizan a la frecuencia central de cada tercio de octava y la variable que se representa (*Excess Attenuation*) se define como:

$$EA = -20 \log \left| \frac{p}{p^*} \right| \quad (7)$$

donde p es la presión acústica en el receptor en la situación representada en la figura 2 y p^* la que habría es un caso de propagación libre entre fuente y receptor (esto es, en ausencia de obstáculo y suelo).

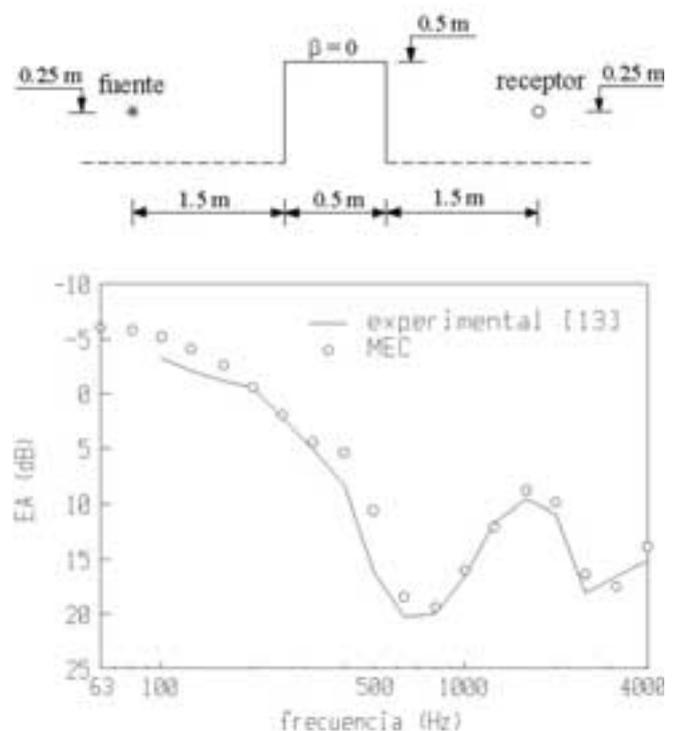


Figura 2a,b. Validación experimental del modelo.

Por las características de la solución fundamental adoptada, la discretización sólo afecta a los contornos del obstáculo. El tamaño de los elementos estará en función de la frecuencia de emisión de la fuente. En la figura 2b se aprecia un buen ajuste de los resultados obtenidos desde el modelo de elementos de contorno propuesto y los experimentales. Esta coincidencia ratifica además la validez del modelo bidimen-

sional para representar la realidad tridimensional siempre que analicemos estas variables dentro del plano donde se sitúa la fuente puntual [8].

Espectros de pérdida por inserción de barreras

Es habitual expresar la eficacia de una barrera a través de una variable denominada *coeficiente de pérdida por inserción* (IL) que representa la reducción del nivel de ruido en el receptor por la inclusión de la pantalla. Matemáticamente se define como:

$$IL = -20 \log \left| \frac{p}{p^*} \right| \quad (8)$$

donde p y p^* representan la presión acústica en el receptor con barrera y sin barrera respectivamente.

Es conocido que el principio de funcionamiento de este tipo de medidas es la reflexión de la onda incidente creando, por tanto, una zona de sombra del lado del receptor. Por tanto, la característica que más influye en su respuesta es la altura, o más concretamente, su altura efectiva (h_{ef}) que no es más que la altura del punto de confluencia de la vertical desde la base de la barrera con el haz incidente de mayor pendiente que la misma es capaz de interceptar.

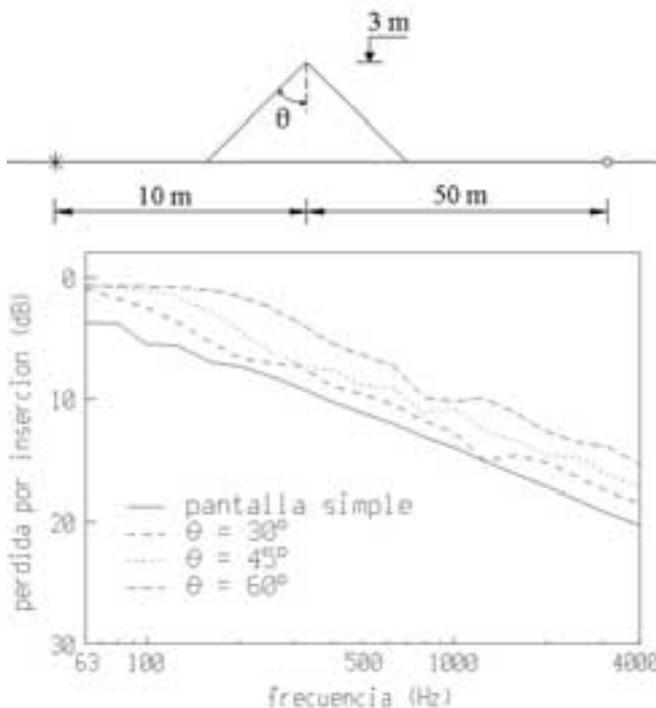


Figura 3a,b. Espectros de IL. Sección transversal en cuña.

Los autores de este artículo, además de este efecto, han obtenido resultados de espectros de pérdida por inserción para un importante número de tipologías de pantallas con su-

perficie absorbentes o no [1]. Aquí, por razones de espacio, serán reproducidos unos pocos. Por tanto, manteniendo la altura efectiva constante (3 metros), situando la fuente a 10 metros del eje de la pantalla y el receptor a 50 metros del mismo punto, ambos a nivel del suelo, se presentarán los espectros de IL para barreras de sección triangular (pantalla en forma de cuña) y pantallas en **Y** con superficies completamente reflectantes. El terreno también tiene admitancia nula. Estamos interesados en presentar algunos resultados que permitan visualizar la importancia que tiene el perfil del obstáculo.

En el primer caso la geometría se presenta en la figura 3a. El espectro de IL para diferentes valores de inclinación del talud se presentan en la figura 3b. Puede observarse que la eficacia de la barrera en cuña es inferior a la correspondiente a una pantalla simple vertical de la misma altura también representada ($\theta=90^\circ$). Además dicha eficacia disminuye de forma significativa conforme disminuye la pendiente de los taludes, lo cual puede atribuirse a que menores inclinaciones favorecen la difracción de la onda alrededor del obstáculo.

Las pantallas en forma de **Y**, también estudiadas por otros autores haciendo uso del MEC, presentan una geometría que dificulta la difracción de la onda por encima la misma (figura 4a). Así, el segundo brazo (del lado del receptor) refleja parte de la energía que difracta sobre el primer brazo (del lado de la fuente). En la figura 4b se comparan los resultados para diferentes ángulos de inclinación de los brazos

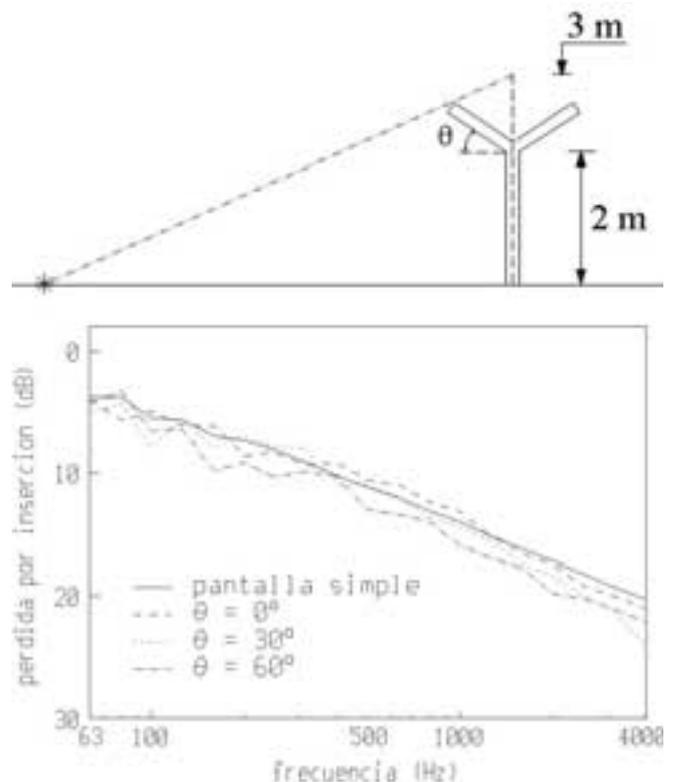


Figura 4a,b. Espectros de IL. Pantalla en Y.

con los obtenidos para una pantalla simple vertical. Se aprecia que la eficacia de estas pantallas es superior para $\theta=30^\circ$ y $\theta=60^\circ$, siendo similar para pantallas en forma de T ($\theta=0^\circ$).

En lo que sigue se intenta evaluar la influencia que tiene la capacidad absorbente de la superficie de la pantalla en su eficacia con respecto de la misma barrera cuando sus contornos son completamente reflejantes. Las distintas combinaciones de superficies absorbentes se recoge en la figura 5a para la pantalla en Y. En esta figura la línea de puntos indica un material con capacidad de absorción ($\sigma=20.000 \text{ Nsm}^{-4}$) y espesor 10 cm que puede corresponderse con una fibra de vidrio de 35 Kg/m^3 de densidad [12]. El terreno en todos los casos es perfectamente reflejante. La figura 5b muestra los resultados para $\theta = 30^\circ$. Entre los casos 1 (completamente reflejante) y 2 apenas hay diferencias. Los resultados para los casos 3 y 4 muestran que es más adecuado incorporar tratamientos absorbentes en las superficies de la barrera que dificultan el camino de la onda difractada.

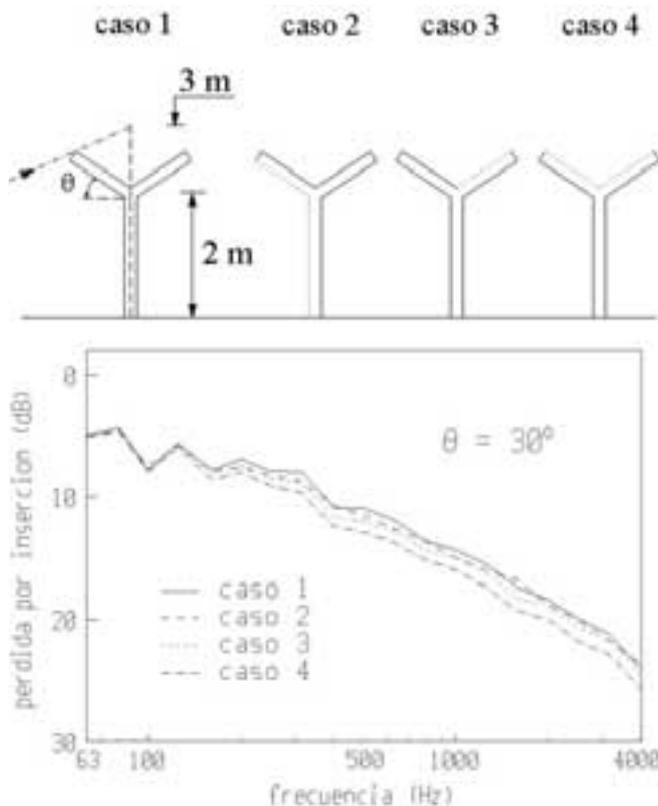


Figura 5a,b. Espectros de IL. Pantalla en Y. Influencia del tratamiento absorbente de la superficie.

Influencia de la capacidad absorbente del suelo

En este apartado nos plantearemos en que medida se ve afectada la pérdida por inserción de la pantalla cuando el suelo tiene cierta capacidad absorbente. Para ello, estudiemos en primer lugar el efecto de absorción del terreno en

presencia de tres tipologías de pantalla con alturas efectivas de 3 y 5 metros respectivamente. La geometrías estudiadas son la pantalla simple vertical, la barrera en forma de cuña ($\theta=60^\circ$) y otra cuya sección transversal tiene forma trapezoidal (barrera en forma de dique) (figura 6) con $\theta=60^\circ$.

En la figura 7 se representa el *coeficiente de pérdida por absorción del terreno* (AL) para las tipologías mencionadas. Fuente y receptor están en las mismas localizaciones que en los ejemplos anteriores. Matemáticamente definimos el AL como sigue:

$$AL = -20 \log \left| \frac{p_{SA}}{p_{SR}} \right| \quad (9)$$

donde p_{SA} y p_{SR} representan las presiones en el receptor con terreno absorbente y reflejante respectivamente. Para el problema con semiespacio absorbente se considera $\sigma=300.000 \text{ Nsm}^{-4}$ que se corresponde con un terreno provisto de cubierta vegetal. En esta figura se incluye también el espectro de AL para la situación sin barrera (semiespacio). Se observa cómo los resultados se agrupan según sea la altura efectiva de la pantalla independientemente de su forma. Deducimos, por tanto, que el AL depende fundamentalmente de la altura efectiva de la pantalla y de las características absorbentes del terreno. Esta conclusión permite proponer la obtención del IL de una pantalla de tipología cualquiera sobre terreno con capacidad absorbente (IL_{SA}) sin más que conocer el IL de la misma sobre terreno reflejante (IL_{SR}), el AL para el mismo terreno sin barrera (semiespacio) y el mismo coeficiente para una barrera de igual altura efectiva que la que analizamos (p.e. una pantalla simple vertical). Las operaciones matemáticas que permiten llegar a esa conclusión son simples. Así:

$$IL_{SA} = AL_{P.simple} - AL_{Semiesp.} + IL_{SR} \quad (10)$$

La figura 8 ratifica la validez de la aproximación (10) para la barrera en forma de dique de la figura 6.

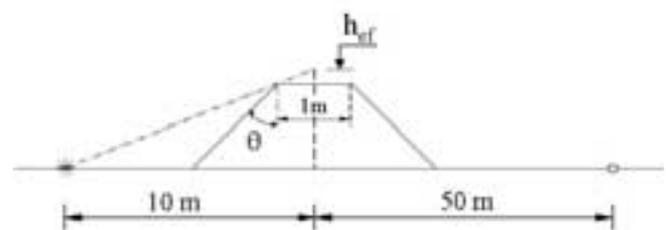


Figura 6. Barrera en forma de dique.

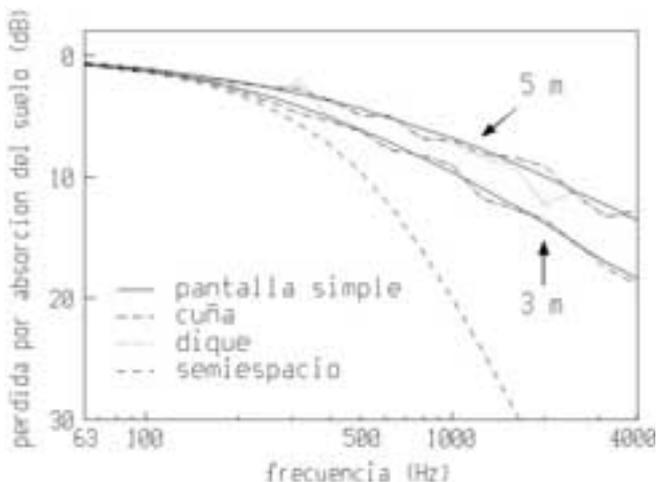


Figura 7. Espectros de pérdida por absorción del terreno.

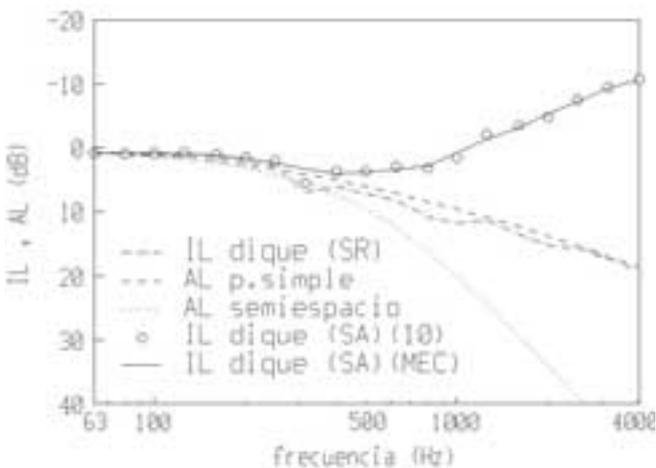


Figura 8. Espectro de IL para dique sobre terreno vegetal.

Vías deprimidas

Esta situación es habitual en el trazado de nuestras carreteras. En ella, la vía se encuentra a una cota inferior a la del terreno circundante. Desde el punto de vista del MEC, tal y como se ha planteado hasta el momento en este artículo, esta configuración presenta algunos inconvenientes si se pretende hacer uso de la misma solución fundamental y evitar con ello la discretización del semiespacio.

El procedimiento que se propone para esta geometría (figura 9) evita estos problemas y consiste en tratar el dominio de partida (Ω) como dos regiones distintas (Ω_1 y Ω_2) con un contorno (Γ) que será la interfase entre ambas. En cada una de estas regiones se aplica el método en los términos conocidos. Así, en Ω_1 puede evitarse la discretización del semiespacio (Γ_1) y en Ω_2 hacer lo propio con el contorno horizontal que representa el fondo de la depresión. El montaje de ambos sistemas de ecuaciones en uno

es simple imponiendo equilibrio de presiones y compatibilidad (igualdad de flujos de presión) en los nodos de la interfase (Γ_1). En [1] puede verse en detalle este procedimiento.

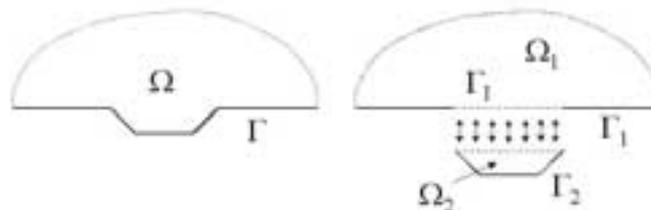


Figura 9. Vías deprimidas y procedimiento de resolución mediante subregiones.

Situando la fuente en el contorno que define el fondo del desmonte, con esta estrategia numérica se han obtenido resultados de reducción de impacto para una geometría con 3 metros de desnivel y taludes a 60° con la horizontal. El problema de referencia es el correspondiente a una fuente pulsando en el semiespacio. Los valores se obtienen en cada punto del medio para frecuencias centrales de tercios de octava. Haciendo uso de un espectro representativo para el ruido de tráfico [4] pueden combinarse los resultados a cada frecuencia para obtener un coeficiente de pérdida para el espectro completo. Estos resultados en el entorno de la depresión se presentan en la figura 10 donde las distancias están en metros (la fuente se encuentra [0,-3]). Debido a la simetría del problema sólo se representa la mitad de la geometría.

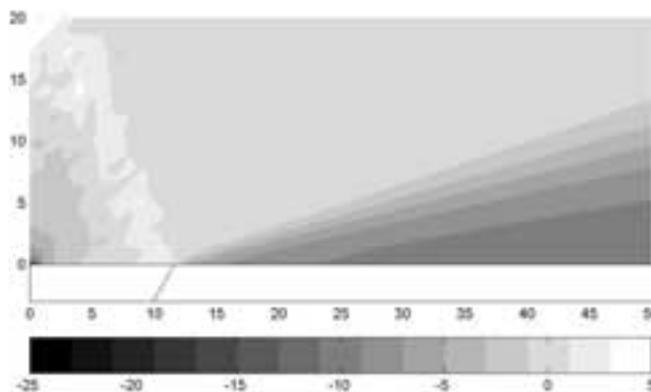


Figura 10. Mapa de reducción de impacto provocado por la depresión de la vía.

Conclusiones

En este artículo se han presentado algunos de los resultados obtenidos por los autores [1] en el campo del análisis de la eficiencia de medidas anti-ruido en el entorno de carreteras haciendo uso del Método de los Elementos de Contorno. Se ha mostrado la validez del procedimiento a través de re-

sultados experimentales y se han presentado algunas conclusiones para perfiles habituales de barreras, estudiando además la influencia que el carácter absorbente del terreno tiene en la respuesta de aquellas. Por último, se propone un procedimiento sencillo para el caso de vías deprimidas que permite su estudio con un ahorro considerable en el número de grados de libertad del problema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Educación del Gobierno de Canarias (Proy. N° 2643P/94) y la Fundación Universitaria de Las Palmas. Los autores agradecen las ayudas concedidas.

Referencias

- [1] Maeso, O. y Aznárez, J., *Reducción del impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del MEC*, Servicio de Reprografía de la U.L.P.G.C. (1998).
- [2] Chirino, F., Aznárez, J. y Maeso, O., *Un modelo numérico para la estimación de la eficiencia de pantallas acústicas*, Anales de Ingeniería Mecánica, 4, 33-39 (1998).
- [3] Sez nec, R., *Diffraction of sound around a barrier: use of the boundary elements technique*, J. Sound and Vibration, 73, 195-209 (1980).
- [4] Hothersall, D.C., Chandler-Wilde, S.N. y Hajmirzae, M.N., *Efficiency of single noise barriers*, J. Sound and Vibration, 146(2), 303-322 (1991).
- [5] Hothersall, D.C., Crombie, D.H. y Chandler-Wilde, S.N., *The performance of T-profile and associated noise barriers*, Applied Acoustics, 32, 269-287 (1991).
- [6] Crombie, D.H. y Hothersall, D.C., *The performance of multiple noise barriers*, J. Sound and Vibration, 176(4), 459-473 (1995).
- [7] Antes H., *Applications in environmental noise*, Boundary Element Methods in Acoustics, Ciskowski & Brebbia Ed., CMP Elsevier (1995).
- [8] Watts, G.R., *Acoustic performance of parallel traffic noise barriers*, Applied Acoustics, 47(2), 95-119 (1996).
- [9] Pfretzschner, J., Simón, F., Moreno, A. y De la Colina, C., *Índice de pérdidas por inserción en barreras con reflexiones en el terreno*, Proc. Jornadas Nacionales de Acústica (1995).
- [10] Sanchís, A., Giménez, A., Marín, A. y Solana, P.E., *Aplicación del MEC para la determinación de la atenuación de ruido producido por barreras*, Revista de Acústica, 28 (1997).
- [11] Domínguez, J., *Boundary Elements in dynamics*, CMP Elsevier (1993).
- [12] Delaney, M.E. y Bazley, E.N., *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, Applied Acoustics, 3, 105-116 (1970).
- [13] Rasmussen, K.B., *Sound propagation over non-flat terrain*, Danish Acoustical Laboratory Rep.No.35, The Danish Academy of Technical Sciences (1982).