



**PALACIO DE CONGRESOS
DE GRAN CANARIA.**

RECINTO FIERAL DE CANARIAS.



ORGANIZA:

COLEGIO DE INGENIEROS TÉCNICOS DE OBRAS
PÚBLICAS DE LAS PALMAS.
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA:
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.

COLABORAN:

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA.
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN
TERRITORIAL DEL GOBIERNO DE CANARIAS.

COOPERAN:

CONSEJERÍA DE INFRAESTRUCTURAS, TRANSPORTE Y
VIVIENDA DEL GOBIERNO DE CANARIAS.
VICECONSEJERÍA DE INFRAESTRUCTURAS Y
PLANIFICACIÓN DEL GOBIERNO DE CANARIAS.
COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.

EMPRESAS:

- ANIPAR.
- BITUMEX.
- DRAGADOS, S.A.
- HERMANOS TITO.
- NECSO, ENTRECANALES CUBIERTAS, S.A.
- OBRA Y ASFALTOS CANARIOS, S.L.
- PROBISA.
- SATOCAN.

Director Técnico de las Jornadas:

D. Dámaso M. Alegre Marrades.
Presidente de ANIPAR.

Director Académico:

D. Miguel Ángel Franesqui García.
Departamento de Ingeniería Civil de la U.L.P.G.C.

Director de las Jornadas:

D. José Suárez Megías.
Delegado de la Asociación Española de la Carretera en Canarias.



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA



COLEGIO DE INGENIEROS
TÉCNICOS DE OBRAS
PÚBLICAS DE LAS PALMAS

X JORNADAS DE CARRETERAS.

"LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA"

Las Palmas de Gran Canaria
14 y 15 de Abril de 2005.

Sede: Palacio de Congresos
de Gran Canaria.

Recinto Ferial de Canarias
(INFECAR)

Avda. de la Feria, 1.
Las Palmas de G.C.



GOBIERNO DE CANARIAS
CONSEJERÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN
TERRITORIAL.

Jueves, 14 de Abril de 2005.

- 09:00 h Inscripciones y recogida de documentación.
- 09:30 h Inauguración de las Jornadas:
Ilmo. Sr. D. Gregorio Guadalupe Rodríguez.
Viceconsejero de Infraestructuras y Planificación del
Gobierno de Canarias.

Presentación:

D. Orlando Maeso Fortuny.
Director del Departamento de Ingeniería Civil de la
U.L.P.G.C.

SESIÓN I:

Presidente de la mesa:
D. Juan Carlos Núñez Ladeveze.
Decano del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos de Las Palmas de Gran Canaria.

10:00 h Primera Ponencia: "El Ruido como Contaminante Atmosférico."

Ponente: D. Leopoldo Ballarín Marcos.
Director Técnico Brüel & Kjær.

10:45 h Segunda Ponencia: "La Directiva Europea sobre Gestión de Ruido Ambiental. Su transposición a la Legislación Española. La Ley del Ruido."

Ponente: José Manuel Sanz Sa.
Ministerio de Medio Ambiente.

11:30 h CAFÉ.

12:15 h Tercera Ponencia: "La Gestión del Ruido Ambiental en el Ambito Local: Instrumentos Técnicos y Jurídicos."

Ponente: D. José Matías Ramos Trujillo.
Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria.
Ponente: D. Adolfo Jiménez Jaén.
Profesor del Dpto. de Derecho Jurídico de la U.L.P.G.C.

13:15 h COLOQUIO.

14:00 h Almuerzo en el Recinto Ferial.

SESIÓN II:

Presidente de la mesa:
D. Luis Fernando Martín Rodríguez.
Decano del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras
Públicas de Las Palmas.

16:00 h Cuarta Ponencia: "Los Mapas Estratégicos de Ruido en las Grandes Infraestructuras, Carreteras, Ferrocarriles y Aeropuertos."

Ponente: D. Fernando Segué Echazarreta.
Dto. del Programa de Contaminación Acústica. CEDEX.
Ponente: D. Jean Pierre Clairbois.
Presidente C.E./NTC226/WG6. Consultor Director de A-Tech, Bruselas.

BOLETÍN DE INSCRIPCIÓN.

X Jornadas de Carreteras:
"La Contaminación Acústica".

Nombre: _____
Apellidos: _____
Organismo/Empresa: _____
Dirección: _____
CP: _____ Población: _____
Provincia/Isla: _____
Tfno: _____ Fax: _____

CUOTA DE ABONO:

Profesionales: 200,00 €
Estudiantes: 36,00 €

-Ingreso en Bankinter: N° Cuenta:

0128 / 0800 / 00 / 0100502047

-Indicar el nombre del asistente, así como, la
referencia: **Jornadas de Carreteras.**

-Los profesionales deben enviar el justificante de
ingreso al Fax: **928 38 01 27.** Correo electrónico:

laspalmas@citop.es

-Los estudiantes deberán justificar tal condición con
la copia de la matrícula o el carnet de estudiante y
**presentar el justificante de abono en el Aula del
Plotter, Seminario nº 5 del Dpto. de Ingeniería
Civil. Horario:**

Lunes a Viernes de 9 a 12 h: 16 a 19 h.

-Al finalizar las Jornadas se entregará un certificado
de asistencia.

Ruido de tráfico: un modelo numérico para el estudio y diseño de pantallas acústicas

Orlando Maeso Fortuny y Juan José Aznárez González
Departamento de Ingeniería Civil de la ULPGC

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

No cabe duda que entre los subproductos más negativos del desarrollo industrial y tecnológico de la sociedad moderna destaca el deterioro del medio ambiente. En nuestras ciudades y áreas urbanas merece destacarse el impacto asociado al transporte en general y, sobre todo, al tráfico rodado. El fenómeno del ruido contaminante, por su incidencia directa sobre la salud y el rendimiento de las personas, resulta ser el factor ambiental del que más se quejan los ciudadanos en la mayoría de los estudios de opinión.

Haciéndose eco de esta situación, la OCDE, la Unión Europea y otros organismos internacionales han promovido diversas recomendaciones para intentar reducir el nivel de ruido actual y, especialmente, para minimizar el impacto de ruido derivado de nuevas infraestructuras de transporte. En este sentido puede recordarse la presentación en Madrid de la monografía que el comité de expertos de la OCDE ha desarrollado bajo el título genérico de "Reducción del Ruido en el Entorno de Carreteras" [1].

Las políticas de lucha contra el ruido están en general orientadas hacia la consecución de un doble objetivo: de una parte recuperar en lo posible ambientes sonoros ya degradados, y de otra evitar la creación de nuevas situaciones no deseadas. El primero de los casos corresponde a la situación típica de zonas urbanas con una infraestructura ya implantada, donde las posibilidades de actuación son muy limitadas. El problema puede difícilmente abordarse mediante actuaciones estrictamente "acústicas" (pantallas, depresión de vías, pavimentos absorbentes...) y es preciso en la mayoría de los casos actuar mediante planes específicos de recuperación que afectan a toda la actividad de la zona: modificación de usos, limitación de velocidades y horario de tráfico, redireccionamiento de rutas, etc.

El problema es radicalmente distinto en el caso de infraestructuras de nueva creación. Se trata ahora de ser capaces de prever correctamente el impacto asociado a la nueva vía, y en base a ello modificar su diseño, incorporando las medidas necesarias que mantengan los niveles de ruido dentro de límites aceptables.

Sin embargo, la disminución del nivel de ruido no es un problema sencillo, y en ello influye considerablemente la forma en la que el oído humano percibe la señal sonora. De hecho, la relación que existe entre disminución de potencia sonora y sensación de mejoría subjetiva no es lineal. Para cuantificar el problema podemos dar algunos valores numéricos: una reducción del 25% de la energía emitida por una fuente ruidosa (p.e. un medio de transporte) cuantitativamente significaría una reducción de únicamente 1 decibelio (dB), y apenas sería detectada por una persona expuesta a la emisión. Por contra, para que el mismo observador reconozca una clara mejoría subjetiva, que él calificara como una reducción del ruido a la mitad, sería preciso disminuir la emisión en 10 dB, lo que equivale

a eliminar el 90% de la energía acústica inicial.

El problema se complica aun más si tenemos en cuenta que la capacidad de tolerancia de intensidad sonora del oído humano es muy variable para las diferentes frecuencias dentro del amplio espectro de frecuencias audibles asociadas a cualquier fenómeno ruidoso. Esto significa que no siempre es suficiente o apropiado disminuir la intensidad global de la emisión, sino que en muchas situaciones resulta más efectivo modificar el perfil sonoro que capta el receptor, en el sentido de aminorar el rango de frecuencias más molestas. Es este un campo completamente abierto que sólo puede ser abordado si el método de análisis permite un estudio selectivo de la propagación a cada una de las frecuencias de la banda de audición -punto en el que flaquean algunos de los procedimientos clásicos de estudio empleados en la actualidad dentro de la acústica ambiental-.

Para determinar el nivel de ruido en una situación dada, una de las técnicas más utilizadas es la medida experimental directa, mediante sonómetros u otros equipos de medida. Es ésta una actuación indispensable para la cuantificación del problema ambiental en una situación real, y actualmente es la forma más precisa y segura de elaborar mapas de contaminación acústica. Aun así, esta técnica adolece de dos problemas fundamentales. Por un lado es costosa si se quiere un alto nivel de detalle y por tanto se incluye un elevado número de puntos de medida, y, por otro, no permite predecir los niveles de ruido en situaciones futuras, como es por ejemplo el caso del ruido en el entorno de una carretera que se pretende construir, o bien de una ya construida que se pretende aumentar con la creación de nuevos carriles.

Para predecir el nivel de ruido existen diversos métodos analíticos y numéricos basados en diferentes técnicas (método de rayos acústicos, simulación partícula a partícula...). Entre ellos, es el método de rayos acústicos el más ampliamente utilizado en acústica ambiental. Proporciona una descripción de la propagación de las ondas acústicas a lo largo de grandes distancias, como por ejemplo la atmósfera, o la propagación bajo el agua. Para ello se utilizan familias de rayos, y es posible mediante la introducción de coeficientes semi empíricos, el tomar en consideración de forma aproximada fenómenos perturbadores como faltas de homogeneidad por gradientes de temperatura, viento, etc. A pesar de su indudable aptitud como método de predicción de ruido ambiental, estos métodos tienen como principal limitación la dificultad de tratar geometrías complicadas, como por ejemplo, detalles de la forma de las pantallas acústicas o de la geometría de los edificios. Otra limitación importante es que este método aporta información del nivel sonoro en términos de intensidad, a partir de los datos que definan la fuente perturbadora y la geometría ambiente. Sin embargo, no aporta información alguna acerca del contenido en frecuencia de la onda global que se propaga, ni, por tanto, de las posibles atenuaciones o amplificaciones que las diferentes medidas correctoras (p.e. pantallas acústicas) puedan ocasionar en determinados rangos de frecuencias más molestas al oído humano, factor éste que ya ha sido comentado como necesario en las actuales estrategias de disminución de impacto.

Con el desarrollo de los métodos numéricos se abren nuevas posibilidades de abordar el problema de la propagación de ruido en ambientes complejos. Los más empleados son el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de los Elementos de Contorno (MEC). La dificultad del MEF para abordar los problemas de dominios infinitos o de

campo libre, como es el caso de la acústica ambiental, hacen que el MEC aparezca como el más adecuado. Para el lector poco familiarizado con el método, la lectura de Domínguez [2] puede resultar un espléndido punto de partida en la comprensión de las singularidades del mismo y sus ventajas e inconvenientes frente al MEF. La idea de aplicar el MEC al estudio de medidas de aislamiento acústico continua siendo en la actualidad un tema abierto donde existen multitud de aspectos en los que pueden realizarse aportaciones interesantes, algunas de las cuales se recogen en este trabajo.

OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

El objetivo concreto de este trabajo ha sido el desarrollo de un modelo numérico capaz de simular de una manera realista el fenómeno de la propagación de ondas acústicas generadas por cualquier fuente, y que sea útil, por tanto, para la determinación del nivel de ruido, y su composición en frecuencias, en las inmediaciones. A la luz de los resultados obtenidos, podrán determinarse medidas correctoras que permitan reducir el impacto producido (utilización de pantallas acústicas, soterramiento de vías, etc.).

La colocación de barreras acústicas entre la fuente y el receptor constituye el procedimiento más habitual para disminuir el impacto acústico (estamos excluyendo obviamente la posibilidad de disminución del ruido en origen). La inclusión de estos elementos interfiere el recorrido normal de la propagación creando una zona de sombra del lado opuesto al emisor donde los niveles sonoros serán inferiores respecto de la situación en que no exista barrera. En este trabajo se analiza la eficacia de estas medidas y se estudian comparativamente diferentes diseños haciendo uso de un modelo numérico basado en el Método de los Elementos de Contorno [3, 4]. En cualquier caso, sea cual sea el modelo de análisis, éste habrá de simular de la forma más real posible los efectos de reflexión, difracción y absorción provocados por este elemento.

Si se considera el caso de tráfico rodado, se supone un estado de tráfico denso y continuo, y una calzada recta, la situación de propagación acústica es idéntica en cualquier plano perpendicular a la vía. El problema entonces puede ser estudiado mediante un modelo bidimensional (Fig.1). De este modelo simplificado pueden obtenerse conclusiones interesantes en lo que a parámetros de eficacia de medidas anti-ruido se refiere. El análisis requiere la caracterización de las tres componentes implicadas en el mismo: la fuente, el medio de propagación y el entorno. Para definir la fuente es necesario conocer tanto su rango en frecuencias como la potencia sonora asociada a cada una de ellas. Para el caso de ruido de tráfico existen algunos espectros normalizados. La vía de transmisión de la propagación es el aire, que se modela como medio elástico compresible, y para el que se admiten las hipótesis clásicas de homogeneidad e isotropía con viscosidad despreciable y comportamiento lineal. El entorno se caracteriza por su geometría, así como por la posible capacidad absorbente de energía acústica de los diferentes obstáculos, que a su vez depende de las características de los materiales y del tratamiento de sus superficies.

Por tanto, cualquier metodología que aborde el problema deberá ser capaz de modelar adecuadamente todos estos aspectos. En este trabajo, y como ya se ha anticipado, se hace uso de la formulación dinámica del MEC (ver p.e. [2]), que consiste en un método numérico susceptible de ser programado en un código de ordenador. El usuario introduce los datos relativos a la señal en la fuente, la geometría y las características de los

materiales, y el programa determina el nivel de intensidades acústicas en los puntos del entorno.

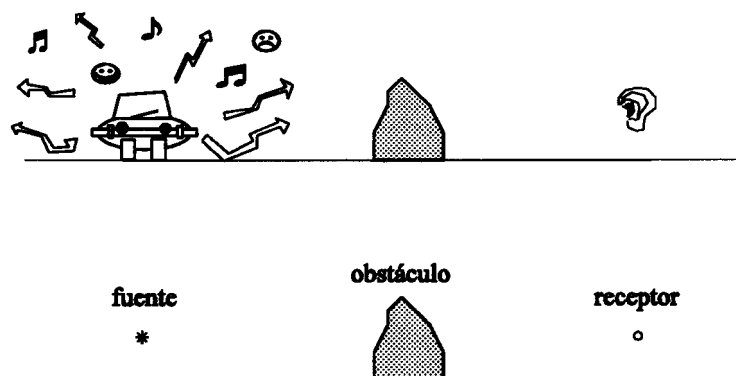


Figura 1. Modelo bidimensional.

Como antecedentes en el uso del MEC en el análisis acústico de barreras pueden destacarse las aportaciones realizadas por Sez nec [5] y más recientemente Hothersall y colaboradores quienes estudian la eficacia de pantallas individuales [6, 7] de geometrías diferentes con o sin superficies absorbentes, y posteriormente configuraciones con varias pantallas consecutivas entre la fuente y el receptor, lo que permite reflexiones consecutivas de la onda difractada por cada pantalla [8]. También en la aplicación del MEC pueden citarse los trabajos de Antes [9] quien analiza configuraciones bi y tridimensionales con barreras de diferente tipología y fuentes en movimiento. Por último referir a Watts [10] que establece una validación muy satisfactoria de los resultados obtenidos mediante este Método con modelos experimentales.

En España, la investigación relacionada con problemas de acústica tiene un desarrollo importante en los últimos años. En 1969 se funda la Sociedad Española de Acústica (SEA) que engloba a reconocidos investigadores nacionales en este campo y que patrocina congresos y revistas de publicación periódica. Así, y relacionado con el problema que nos ocupa, pueden referirse muchas publicaciones de interés que hacen uso de las metodologías descritas. Así, de entre los investigadores pertenecientes al Instituto de Acústica dependiente del CSIC pueden destacarse entre otros los trabajos de Pfretzschner et al [11], directamente relacionados con el estudio acústico de pantallas. Otros trabajos de interés se han desarrollado en nuestro país por investigadores adscritos a diferentes universidades. Sólo mencionando algunos, pueden citarse los realizados por Sanchís et al [12] que aplica el MEC al problema del aislamiento acústico con barreras, Ballesteros et al. [13], Estellés et al. [14], Barti y Servera [15], etc.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El análisis de la propagación del ruido en un medio compresible de viscosidad despreciable -como es el aire- parte de considerar las ondas acústicas como simples ondas longitudinales que crean zonas de compresión y enrarecimiento por la oscilación hacia adelante y atrás de las partículas, estando por tanto la velocidad de partícula en la misma dirección que la velocidad de fase. Es habitual escribir la ecuación de onda en términos de la presión como

variable dependiente, debido a que es la presión acústica $p(\mathbf{x},t)$ la responsable de la percepción sonora:

$$\nabla^2 p(\mathbf{x},t) + \frac{1}{c^2} b(\mathbf{x},t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{x},t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

donde se ha empleado el operador divergencia ∇ y donde c es la velocidad de propagación de las ondas, que depende únicamente de las características termodinámicas del medio. Para el aire pueden darse los siguientes valores significativos:

$T^\circ\text{C}$	c (m/s)
0	331.6
16	341
20	343

El segundo sumando del primer término en (1) hace referencia a la posible existencia de fuentes internas de presión en el medio soporte de la onda.

El emisor se va a representar por una fuente puntual armónica vibrando en la frecuencia central de cada tercio de octava en todo el rango de un espectro normalizado de ruido de tráfico. Esto equivale a realizar un análisis en régimen armónico a cada una de las frecuencias del espectro. La contribución total se obtiene entonces como adición de las contribuciones de cada armónico. Admitimos por tanto una variación armónica de las variables acústicas:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x},t) &= p(\mathbf{x};\omega) e^{i\omega t} \\ b(\mathbf{x},t) &= b(\mathbf{x};\omega) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

donde $p = p(\mathbf{x};\omega)$ es la función de respuesta compleja, i es la unidad imaginaria, y donde se ha introducido el número de onda $k = \omega/c$, siendo ω la frecuencia angular. La sustitución de (2) en (1) conduce de forma inmediata a la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia:

$$\frac{d^2 p}{d x^2} + k^2 p + \frac{1}{c^2} b = 0 \quad (3)$$

La solución del problema habrá de verificar (3) y cumplir con las condiciones impuestas en los contornos del dominio en estudio. Pueden darse de tres tipos de condición de contorno:

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} : \text{ presión conocida (condición tipo Dirichlet)} \\ \frac{\partial p}{\partial n} &= \bar{q} : \text{ flujo conocido (condición tipo Neumann)} \\ \frac{\partial p}{\partial n} &= -i k \beta p : \text{ condición mixta (condición tipo Robin)} \end{aligned}$$

Esta última representa la relación entre flujo ($\partial p / \partial n$) y presión. Depende del número de onda y de la admitancia β del contorno, siendo n la normal al mismo. Si $\beta = 0$ nos encontramos ante un contorno acústicamente rígido. Si $\beta = 1$, toda la energía incidente en dicho contorno sale del dominio en estudio (coeficiente de reflexión nulo). En general β es una variable compleja que puede evaluarse a partir de las características del contorno (Delany y Bazley, [16]).

El modelo utilizado para determinar el campo acústico en el dominio Ω , y en concreto la eficacia de pantallas acústicas es el representado en la figura 2. El emisor será una fuente puntual armónica caracterizada por su frecuencia de emisión. Los contornos del modelo (Γ) 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. Distinguimos tres tipos de contornos:

- los que constituyen la superficie de la pantalla (Γ_p), con cierta capacidad para absorber energía según su admitancia (β_p),
- el contorno que determina la superficie del terreno (Γ_s) con su propia capacidad absorbente (β_s).
- Por último, el contorno correspondiente a zonas alejadas (Γ_∞) a la zona de interés, y en donde el campo acústico producido por la fuente local es despreciable.

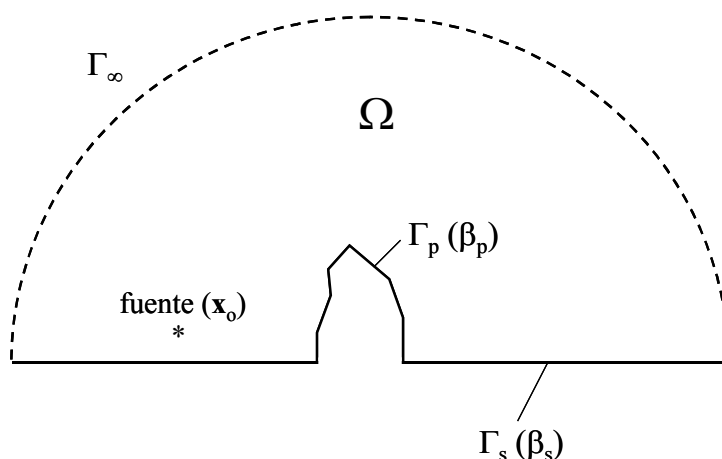


Figura 2. Semiespacio bidimensional con obstáculo.

La solución numérica del problema con el MEC requiere, como en otros métodos de discretización, replantear la ecuación de partida (3) en términos integrales. Esto se consigue utilizando un teorema de reciprocidad integral entre dos soluciones de la ecuación de onda: una es la solución real p que buscamos, que debe satisfacer las condiciones de contorno; La segunda es conocida como solución virtual p^* , debe satisfacer (3) pero no las condiciones de contorno. El origen del MEC está en la selección como solución virtual la correspondiente a una fuente puntual de presión en el medio infinito. Esta solución se conoce como ‘solución fundamental’ y tiene una solución que es conocida explícitamente.

Admitir recta e indefinida la superficie del suelo, con o sin capacidad absorbente, permite

obtener una expresión de la solución fundamental p^* que hace que se satisfaga de forma implícita la condición de contorno en la superficie del suelo [3]. Además la solución p^* satisface las condiciones de radiación y regularidad, por lo que se anula en Γ_∞ . Esto va a tener como consecuencia que sólo será necesario considerar en la ecuación integral aquellos contornos que conforman la pantalla (Γ_p), lo cual implica un considerable ahorro desde el punto de vista computacional. Debe tenerse en cuenta que independientemente de lo cercano a la realidad que se encuentre esta simplificación geométrica del suelo, lo que se pretende es el estudio de la eficacia de la pantalla, lo cual puede (y debe) independizarse de otros aspectos como la topografía. Obviamente, esto no quiere decir que la topografía local no altere el mapa de presiones producido por una fuente determinada. Así la ecuación integral de partida, extendida a los contornos del obstáculo puede expresarse como:

$$p_i + \int_{\Gamma_p} p \frac{\partial p^*}{\partial n} d\Gamma = p_o^* + \int_{\Gamma_p} \frac{\partial p}{\partial n} p^* d\Gamma \quad (4)$$

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 (Γ_s) de admitancia dato (β_s). 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). Por lo demás n representa un vector unitario normal al contorno en cada punto. Puede obtenerse una expresión que sólo involucra variables en el contorno si el punto de colocación se escoge sobre Γ_p :

$$c_i p_i = p_o^* - \int_{\Gamma_p} \left(\frac{\partial p^*}{\partial n} + i k \beta_p p^* \right) p d\Gamma \quad (5)$$

donde c_i es un término que depende de la geometría local del punto i donde la fuente es aplicada en el problema virtual (ver p.e. [2]) y donde ya hemos incorporado la condición de contorno correspondiente a la superficie del obstáculo.

La resolución de (5) 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. En el modelo desarrollado por los autores 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:

$$p^j = \phi_1 p_1^j + \phi_2 p_2^j + \phi_3 p_3^j \quad (6)$$

donde ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 son las funciones de aproximación cuadráticas de la variable (funciones de forma) en términos de la coordenada adimensional ξ :

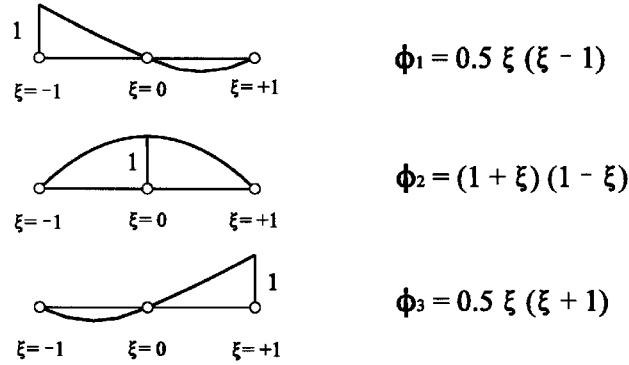


Figura 3. Funciones de forma parabólicas.

Introducida esta aproximación en (5) podemos escribir, para un nodo i genérico de la discretización:

$$c_i p_i = p_o^* - \sum_{j=1}^{NE} \sum_{k=1}^3 \left(h_k^{ij} + i k \beta_j g_k^{ij} \right) p_k^j \quad (7)$$

donde NE representa el número total de elementos en que ha sido dividido el contorno de la pantalla Γ y β_j la admitancia del contorno en cada elemento j , siendo:

$$h_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} \frac{\partial p}{\partial n} \phi_k^* d\Gamma_j \quad ; \quad g_k^{ij} = \int_{\Gamma_j} p^* \phi_k d\Gamma_j \quad (8)$$

los conocidos como núcleos de integración de la solución fundamental y cuya evaluación se realiza, tras algunos arreglos matemáticos, mediante procesos de cuadratura numérica estándar. Al lector interesado en la formulación del MEC puede recomendársele la lectura de Domínguez, [2]. En resumen, mediante este procedimiento hemos convertido la igualdad integral en una ecuación algebraica donde las incógnitas son el valor de la presión en los nodos. Esta discretización de (5), aplicada de forma reiterada utilizando como puntos de colocación todos los nodos del contorno, permite plantear un sistema de ecuaciones algebraico del tipo:

$$(\mathbf{H} + i k \beta \mathbf{G}) \mathbf{P} = \mathbf{P}_o^* \quad (9)$$

donde las incógnitas son el valor de las variables en los nodos (presión y/o flujo) relacionadas a través de la admitancia. En esta expresión $\mathbf{H}$ y $\mathbf{G}$ son matrices cuadradas ($N \times N$), siendo N el número de nodos de la discretización. Asimismo, $\mathbf{P}$ es un vector cuyas componentes son los valores de la presión en los nodos (incógnitas del problema) y $\mathbf{P}_o^*$ un vector de coeficientes donde se almacena el valor obtenido de la solución fundamental en la fuente interna real de presión ($\mathbf{x}_o$) utilizando como punto de colocación cada nodo del contorno. La resolución de este sistema de ecuaciones permite obtener toda la información en el contorno, presión y flujo normal.

Conocidas estas variables en el contorno, la obtención de sus correspondientes valores en puntos interiores del dominio analizado puede realizarse de forma simple sin más que aplicar la ecuación (4) discretizada. Así:

$$p_i = p_o^* - \sum_{j=1}^{NE} \sum_{k=1}^3 \left(h_k^{ij} + i k \beta_j g_k^{ij} \right) p_k^j \quad (10)$$

donde i es ahora cualquier punto del medio donde se desea conocer el valor de la presión y p_k^j la presión en los nodos del contorno obtenida tras resolver (9).

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO

Para establecer la fiabilidad del modelo desarrollado de Elementos de Contorno, se han contrastado sus resultados con algunas medidas experimentales para el problema mostrado en la figura 3a (Rasmussen, [17]). 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 (resistividad $\sigma = 250.000 \text{ Nsm}^{-4}$). Las medidas se realizan a la frecuencia central de cada tercio de octava y la variable que se representa (Excess Attenuation, EA) se define como:

$$EA = -20 \log \left| \frac{p}{p_f} \right| \quad (11)$$

donde p es la presión acústica en el receptor en la situación representada en la figura 3a y p_f la que habría es un caso de propagación libre entre fuente y receptor (esto es, en ausencia de obstáculo y suelo). Los resultados experimentales tomados de Rasmussen [17] se presentan en la figura 3b en trazo continuo.

En la figura se muestran también los resultados numéricos del MEC para la misma geometría y características de las superficies, correspondientes a las frecuencias centrales de las bandas de tercios de octava. Los puntos corresponden a los resultados obtenidos utilizando la solución fundamental del espacio completo (caso en el que hay que discretizar los contorno correspondientes al suelo), y las aspas a los resultados del programa con la solución fundamental del semiespacio (caso en que no es preciso discretizar tales contornos). Las ventajas computacionales que se derivan de la segunda opción quedan reflejadas en el hecho de que discretizando con elementos de longitud $\lambda/4$, (siendo λ la longitud de onda), para la frecuencia de 4000 Hz fueron precisos 1800 nodos en el primer caso, frente a sólo 140 en el segundo. Se aprecia un buen ajuste con los resultados experimentales en ambos casos. La conclusión es doble: por un lado se deduce que el modelo bidimensional de una fuente lineal infinita puede ser comparado con los resultados de una fuente puntual cuando estamos interesados en la solución dentro del plano. Esto ya había sido predicho por otros autores (ver por ejemplo Watts, [10]). Asimismo se deduce que los resultados numéricos para las frecuencias centrales de cada tercio de octava dan una buena indicación de las medidas experimentales de cada banda.

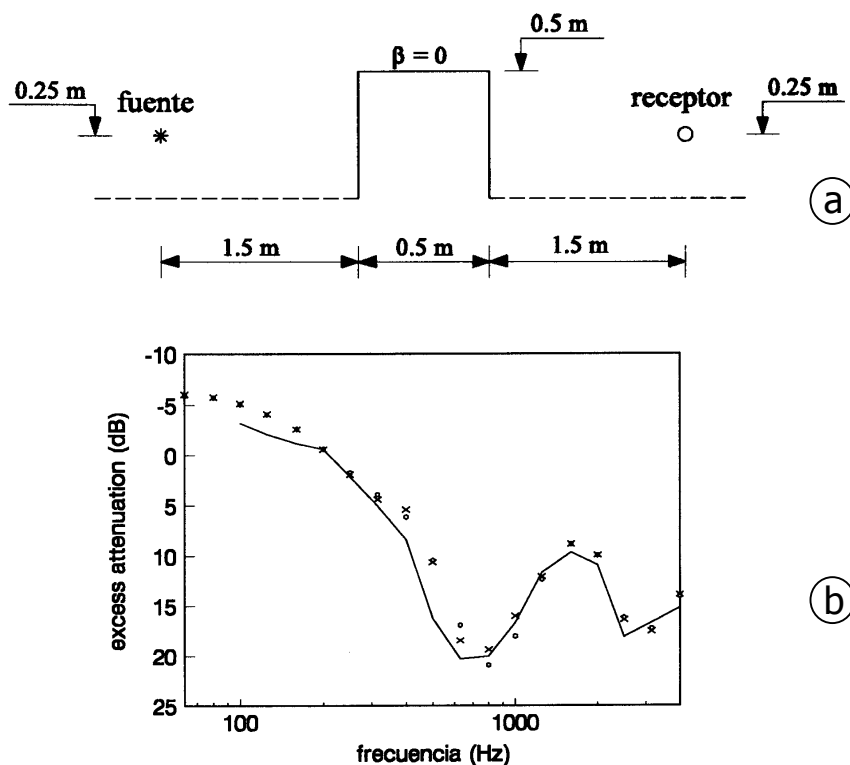


Figura 3a y b. Validación experimental del modelo. Obstáculo reflejante.
Suelo absorbente ($\sigma = 250.000 \text{ Nsm}^{-4}$)

RESULTADOS DEL MODELO. EFICACIA DE PANTALLAS.

Es posible atenuar el ruido producido por la circulación vial construyendo pantallas anti-ruido entre la calzada y las zonas que la bordean, interfiriendo de esta forma en la propagación de las onda sonoras entre la fuente del ruido y el receptor. Estas ondas se difractan sobre la zona superior de la pantalla creando una zona de sombra por detrás de la misma donde los niveles sonoros habrán disminuido. Algunas pantallas pueden reducir los niveles de ruido de 10 a 25 dB(A). Una reducción de 10 decibelios corresponde a una reducción de ruido vial a la mitad.

En el proceso de diseño de una pantalla acústica es necesario aplicar los conceptos físicos elementales subyacentes a la reducción del ruido (si se quiere que ésta sea acústicamente eficaz), pero también es necesario tener en cuenta la importancia de otras características no acústicas como son el mantenimiento, la seguridad, la estética, la construcción, el coste, etc. Igualmente es muy importante asegurar la participación de la comunidad en las decisiones finales relativas al diseño y a la construcción de las pantallas. Aun siendo así, el ámbito de este trabajo tan sólo toma en consideración los aspectos puramente físicos, sin que ello signifique que los restantes sean despreciables en absoluto para una situación real. Del mismo modo tampoco abordaremos otras problemáticas asociadas como son la pérdida de eficacia de las pantallas en el caso de edificios cuya altura sea sensiblemente superior a la barrera, o discontinuidades de ésta por accesos adyacentes o cruces de otras calles, etc.

Según su forma, la pantallas anti-ruido pueden ser:

- Pantallas (barreras) naturales, como los montículos o diques de tierras.
- Pantallas artificiales, como los muros (Fig. 4, 6 y 7).
- La combinación de las dos, como los biomuros o las pantallas sobre taludes (Fig. 5).

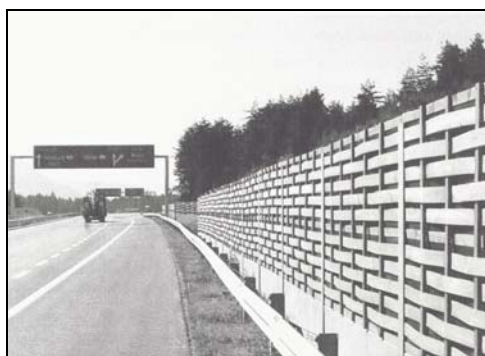


Figura 4. Pantalla en madera absorbente (Austria).



Figura 5. Pantalla con vegetación (biomuro) (Países Bajos).



Figura 6. Pantalla discontinua en aluminio (Italia).



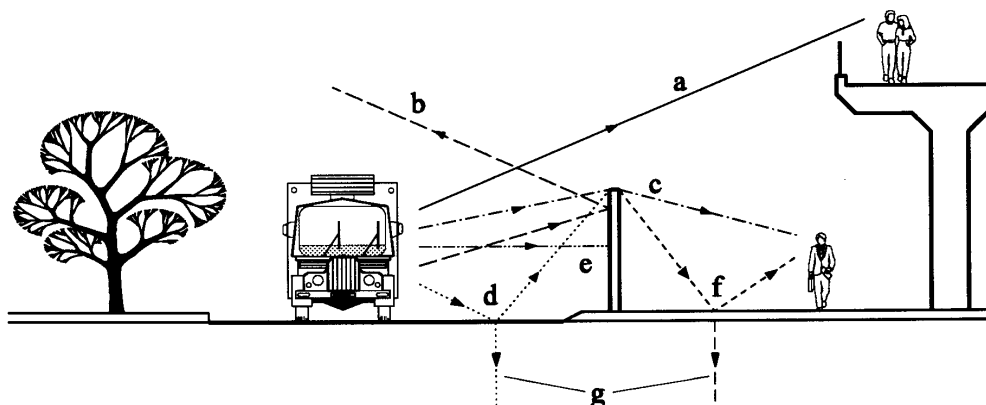
Figura 7. Pantalla con base de hormigón absorbente y elementos transparentes en la parte superior. Las Palmas de G.C. (España).

Hay que destacar que la vegetación no proporciona en general nada más que un efecto psicológico ya que solo aporta una débil reducción a los niveles de ruido de la circulación. La figura 8 presenta los principios acústicos claves ligados al diseño de una pantalla anti-ruido y su emplazamiento. En la bibliografía es muy habitual cuantificar la eficacia de una barrera (o en general de la solución adoptada) por medio de la variable denominada "pérdida por inserción" (Insertion Loss en inglés) que no es otra cosa que la reducción del nivel de ruido en el receptor por la inserción de la pantalla, o de otro modo, el diferencial del nivel de ruido en la situación con barrera (p) en relación al que habría en la situación sin barrera (p_{sin}).

$$IL = -20 \cdot \log \left| \frac{p}{p_{sin}} \right| \quad (\text{dB}) \quad (12)$$

En la figura 8 se aprecian los distintos recorridos de la propagación del sonido entre fuente y receptor. No se ha representado la parte transmitida a través de la pantalla porque esta

contribución (que para el problema estudiado no es muy importante) no está recogida en el modelo empleado. En general, para optimizar la eficacia de la pantalla hay que minimizar cada una de las contribuciones, excepto el efecto "b", "e" y "g" que conviene maximizar. Conviene finalmente decir que más que definir el perfil de la pantalla "óptima", se trata de buscar la mejor adaptada a cada caso en particular. Ello requiere una definición clara del objetivo concreto a satisfacer (cuál es la zona en sombra de interés y rango de frecuencias más sensible), lo cual no es siempre fácil.



Leyenda:

- a** onda que incide directamente. Afecta a los receptores más elevados.
- b** onda reflejada por la pantalla.
- c** onda difractada por la pantalla.
- d** onda reflejada por el suelo y después difractada.
- e** onda absorbida por la pantalla.
- f** onda difractada y luego reflejada.
- g** onda absorbida por el terreno.

Fig. 8. Propagación del ruido de tráfico en presencia de una pantalla acústica.

ESPECTROS DE PÉRDIDA POR INSERCIÓN DE BARRERAS. ESTUDIO PARAMÉTRICO.

El modelo numérico se ha empleado para estudiar diversos tipos de pantallas anti-ruido, en diversas situaciones de funcionamiento. La variable representativa de la eficacia de cada pantalla será la pérdida por inserción (IL) que ya se ha definido. Como los resultados están fuertemente influenciados no sólo por la geometría de la pantalla, sino también por la localización de la fuente y del receptor, así como por la situación relativa de ambos frente a la barrera, se ha escogido una situación de referencia en que las distancias horizontales entre fuente y punto central de la barrera, así como entre éste y el receptor se mantienen constantes. En la figura 9a se muestra un esquema de la configuración escogida, con la fuente distanciada 10 m de una barrera de altura $H = 3$ m. Si la fuente se sitúa por encima del suelo se producen fenómenos bien conocidos de interferencia entre la onda incidente y la onda reflejada por ésta. A cada monofrecuencia, ello derivaría en complicados campos de presión en la zona de recepción tras la pantalla, que se ha visto dependen de los patrones de interferencia en la zona por encima de la barrera. Puede decirse que los niveles acústicos

en el receptor son muy sensibles a la altura de la fuente y de la barrera. Para evitar estos inconvenientes y simplificar los resultados la fuente se ha colocado al nivel del suelo.

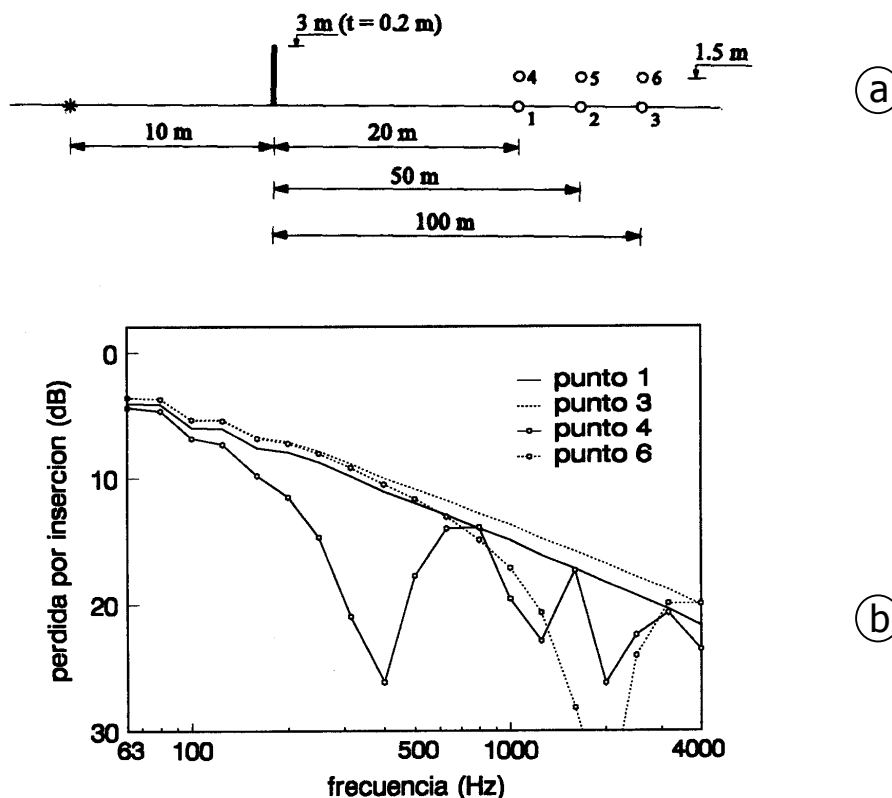


Figura 9a y b. Espectro de pérdida por inserción para una pantalla vertical ($H = 3\text{ m}$).
Diferentes situaciones del receptor. Superficies reflejantes.

Se han calculado los niveles de presión acústica en las seis posiciones de recepción indicadas en la figura 9a, para las frecuencia centrales de las bandas de tercios de octava en el rango entre 63 y 4 KHz. En la figura 9b se aprecia que mientras fuente y receptor se mantengan al nivel del suelo no se producen fenómenos de interferencia debido a las reflexiones con éste. Se obtiene entonces un espectro de respuesta en el que sólo está recogido el efecto de la difracción. En cambio para receptores situados por encima del suelo se producen a cada monofrecuencia fenómenos de interferencia que complican considerablemente la interpretación de la respuesta.

En los ejemplos sucesivos, y siguiendo la pauta adoptada por otros investigadores (p.e. [5, 6]), la fuente y el receptor se situarán al nivel del suelo. Se ha escogido el punto situado a una distancia de 50 m desde la barrera, como punto donde calcular la pérdida IL , y esta configuración geométrica se mantendrá constante durante los experimentos que se presentan a continuación.

Fijadas las posiciones de fuente, receptor y barrera, los principales factores que afectan al nivel de inserción son:

- altura de la pantalla.
- perfil de la pantalla.

- capacidad absorbente de la pantalla (tipo y tratamiento de sus superficies).
- capacidad absorbente del suelo (tipo de suelo).

Aunque existe una interdependencia entre todos ellos, a continuación se va a estudiar la influencia de cada uno de ellos individualmente.

INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA PANTALLA

En la figura 10b se muestran los espectros de pérdida por inserción para varias pantallas simples de 20 cm de espesor y altura H variable (2,3,4 y 5 m), obtenidos con el modelo numérico para las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava. Fuente y receptor están situados tal como se muestra en la figura 10a, ambos en la superficie de un suelo completamente reflejante. Se aprecia que para frecuencias a partir de 125 ó 200 Hz la pérdida por inserción aumenta con la frecuencia a un ritmo aproximado de 3 dB/octava que se mantiene constante independientemente de la altura de la pantalla. Esto se debe a una menor capacidad de difracción tras la barrera a frecuencias elevadas. También se observa que la pérdida es mayor, como es lógico, cuanto más alto sea el obstáculo, puesto que aumenta la cantidad de onda reflejada. La mejora por elevar la altura de 2 a 3 m casi el doble que por elevar la barrera 1 metro más (a 4 m), y aproximadamente igual a la obtenida por elevarla 2 m (a 5 m). Nótese cómo, en estas condiciones de absorción nulas, una barrera de 4 m es capaz de conseguir pérdidas del orden de 20 dB para frecuencias altas (las más molestas), y de mas de 10 dB para frecuencias en el entorno de 500 Hz (que suele tomarse de referencia para caracterizar el ruido de tráfico).

Es la pantalla simple un perfil de barrera que actúa fundamentalmente por reflexión de la onda incidente. Se busca en este caso mayor altura para reflejar un mayor ángulo de haces de rayos incidentes. Por ello es habitual en la bibliografía emplear el parámetro "altura efectiva" (h_{ef}) de la pantalla, que no es mas 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 barrera es capaz de interceptar. En la figura 11a se representan distintas pantallas simples con diferente inclinación, teniendo todas ellas la misma altura efectiva que la de una pantalla vertical de 3 m, que a partir de ahora y en adelante se tomará como referencia. En la figura 11b se aprecia que los resultados de pérdida por inserción de las tres pantallas son prácticamente iguales, lo que confirma la buena aptitud del parámetro h_{ef} en el rango de inclinaciones considerado. Un experimento similar se llevó a cabo para una pantalla curva cuya geometría se presenta en la figura 12a (el centro de curvatura coincide con la posición de la fuente y el radio es constante). La efectividad de esta pantalla aparece en la figura 12b comparada con la de la pantalla simple vertical de la misma altura efectiva, y de nuevo se deduce que la eficacia del mecanismo de reflexión de una pantalla simple está fundamentalmente gobernada por su altura efectiva.

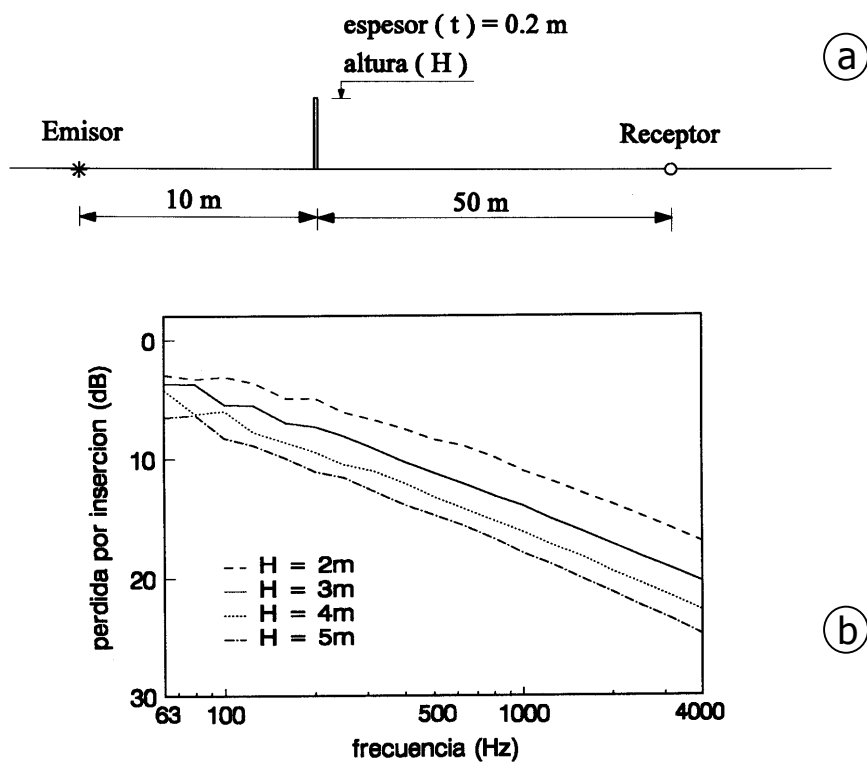


Figura 10a y b. Espectro de pérdida por inserción. Influencia de la altura de la pantalla. Superficies reflejantes

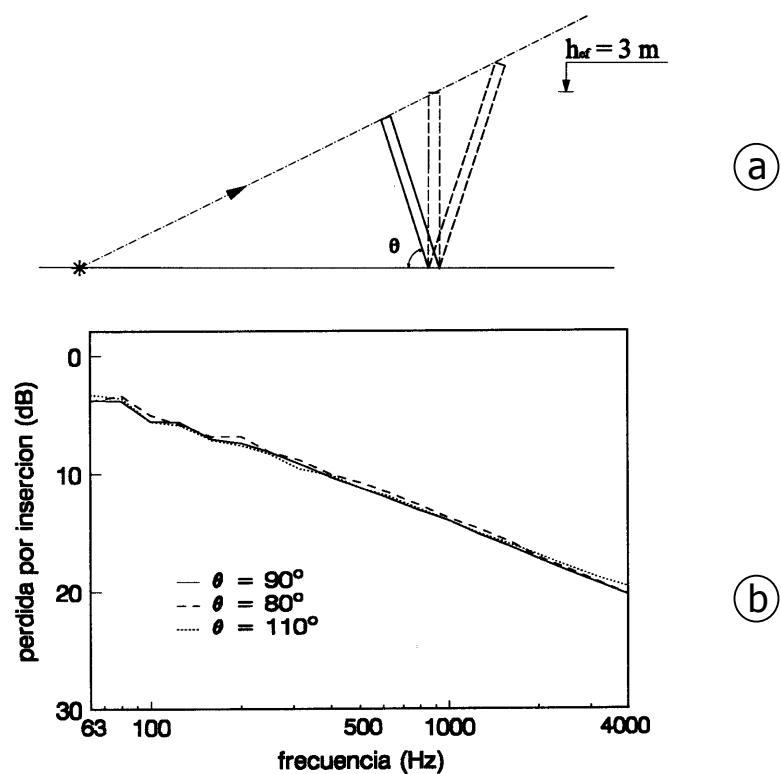


Figura 11a y b. Espectro de pérdida por inserción de una pantalla inclinada. Superficies reflejantes.

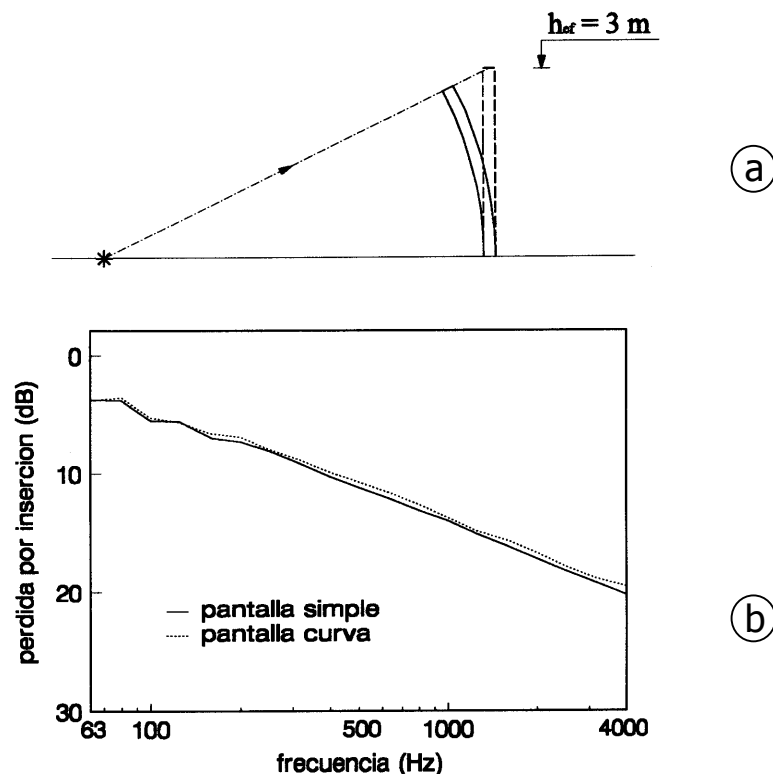


Figura 12a y b. Espectro de pérdida por inserción de pantallas curvas. Superficies reflejantes.

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA PANTALLA

Los autores de han obtenido resultados de espectros de pérdida por inserción para un importante número de tipologías de pantallas con superficies absorbentes o no [3]. 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 reflejantes. 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 13a. El espectro de IL para diferentes valores de inclinación del talud se presentan en la figura 13b. 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 ($\theta=0^\circ$). 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, presentan una geometría que dificulta la difracción de la onda por encima la misma (figura 14a). Así, el segundo brazo refleja parte de la energía que difracta sobre el primer brazo. En la figura 14b se comparan los resultados para diferentes ángulos de inclinación de los brazos 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 ($\theta=0^\circ$).

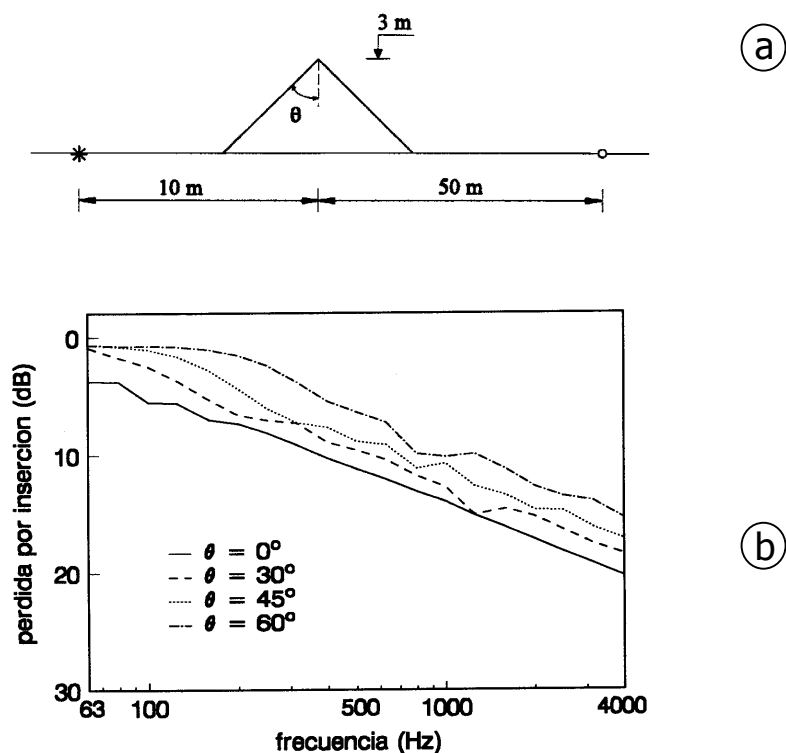


Figura 13a,b. Espectros de IL. Sección transversal en cuña. Superficies reflejantes.

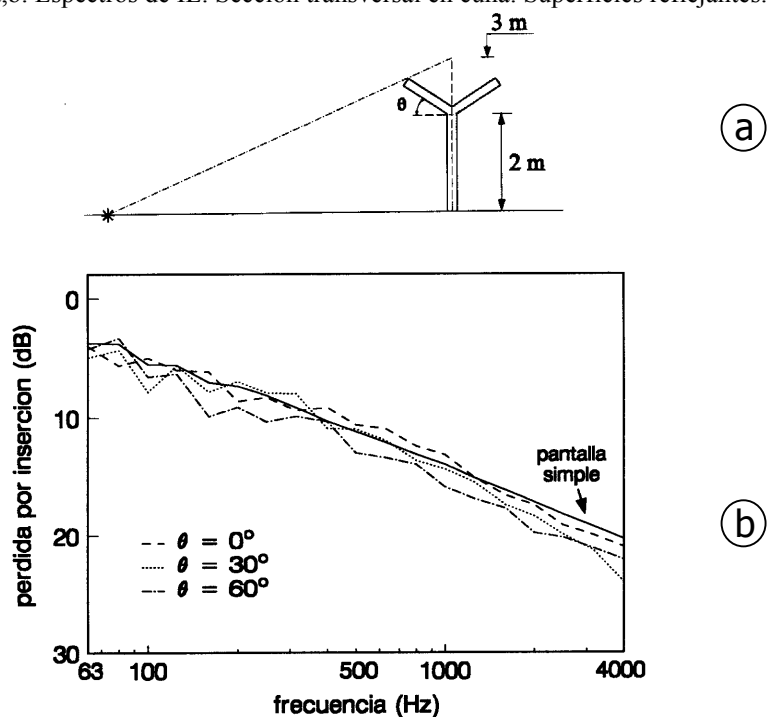


Figura 14a,b. Espectros de IL. Pantalla en Y. Superficies reflejantes.

La idea de utilizar brazos en ramificación para dificultar la difracción de la onda permite

plantearse multitud de geometrías posibles. Una nueva posibilidad es la mostrada en las figuras 15a y b. Se aprecia en este caso una mayor eficacia en la que se ha denominado Caso 3. La conclusión más importante quizás sea que la búsqueda de soluciones óptimas para la geometría de la pantalla requiere un estudio pormenorizado de los efectos locales en las diversas ramas del perfil. Ello por sí sólo supone un amplio campo de trabajo futuro que necesitará del empleo de estrategias de optimización y la definición correcta de los criterios de búsqueda.

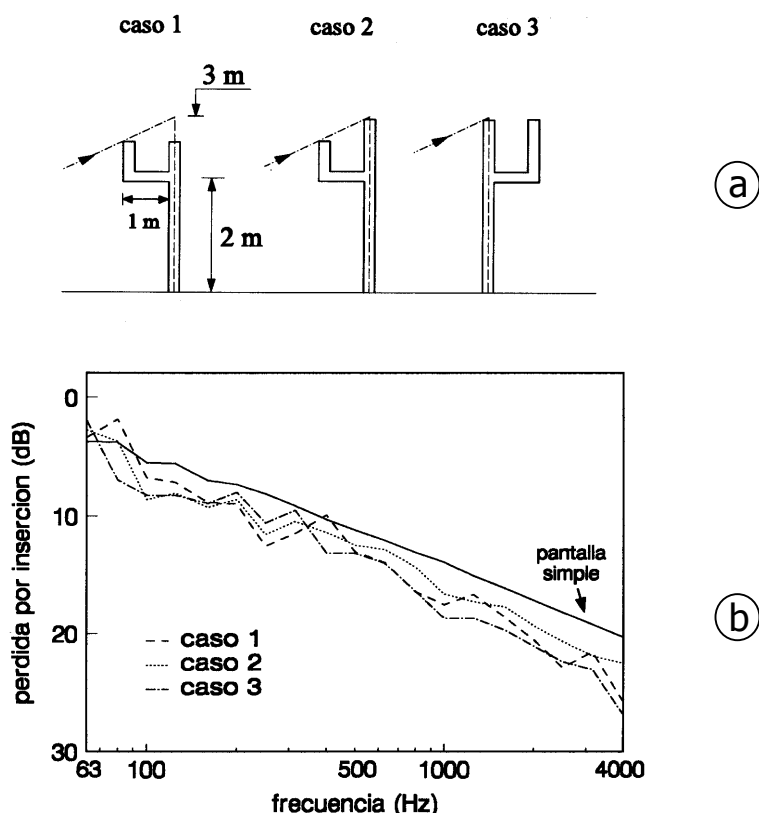


Figura 15a y b. Geometrías de la sección transversal y espectros de IL.
Superficies reflejantes.

TRATAMIENTO ABSORBENTE DE LA SUPERFICIE DE LA PANTALLA

El objetivo de este apartado es evaluar la influencia que pueda tener la capacidad absorbente de la superficie de la pantalla en su eficacia, con respecto al caso de pantallas completamente reflejantes. Para aislar este efecto, en los ejemplos que se presentan a continuación el suelo se considera acústicamente rígido (admitancia nula), todas las pantallas tienen una altura efectiva de 3 m y la posición de la fuente y el receptor respecto a la barrera sigue siendo la misma que en los apartados anteriores. Aunque por razones de espacio los resultados no se van a presentar aquí, los autores han comprobado que el uso de pantallas simples con tratamiento absorbente apenas suponen un aumento de eficacia en comparación con la misma pantalla completamente reflejante. Esta conclusión está de acuerdo con los resultados de la bibliografía consultada. El análisis se centra pues en estudiar otros tipos de barreras con geometrías distintas a la pantalla simple.

La figura 16a muestra las configuraciones elegidas para una pantalla con sección transversal en forma de cuña, con una altura de 3 m y taludes con pendientes de 30°. La situación puede asimilarse al caso de barreras formadas por desmontes de tierra más o menos "blandas" con una capacidad absorbente no despreciable. Se han estudiado las configuraciones representadas de la figura 16a, donde el trazo discontinuo representa una superficie parcialmente absorbente y el trazo continuo las superficies reflejantes. Los resultados de pérdida por inserción de los cuatro casos se muestran en la figura 16b. Se aprecia que el caso 2 es el más eficiente, con una mejora con respecto a la barrera reflejante del orden de 5 dB para las frecuencias más altas. La absorción en el talud enfrente a la fuente es en este caso más interesante que la absorción en el talud hacia atrás (que absorbe fundamentalmente la parte difractada), como se recoge en la comparación entre los casos 3 y 4. En todos los casos la mejora con respecto al caso 1 se incrementa al aumentar la frecuencia, lo que se debe a la mayor capacidad absorbente con las frecuencias altas.

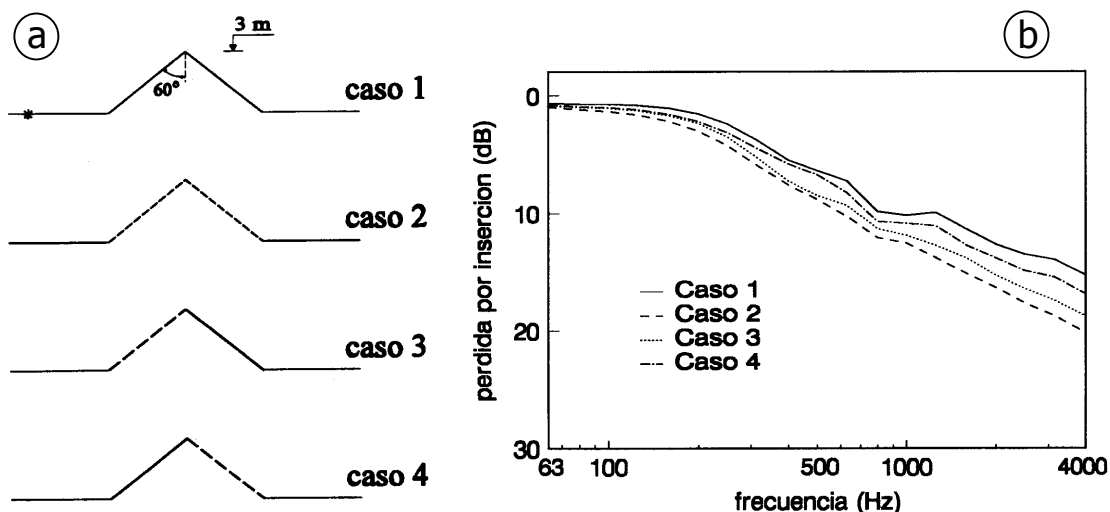


Figura 16a y b. Espectro de pérdida por inserción. Sección en cuña. Influencia del tratamiento absorbente (----- $\sigma = 300.000 \text{ Nsm}^{-4}$).

Aunque no se presentan en este documento, se ha comprobado que la influencia de la absorción es progresivamente menor a medida que la pendiente de los taludes crece. El caso límite es una pendiente vertical ($\theta=0^\circ$), que corresponde a la pantalla vertical. Se deduce que en los obstáculos con un mecanismo de apantallamiento fundamentalmente reflejante (θ pequeño) el uso de recubrimientos absorbentes no introduce mejoras significativas con respecto al uso de superficies reflejantes (generalmente más baratas y de más fácil mantenimiento). Parece, como se ha dicho, que esta conclusión está generalmente aceptada.

En la figura 17a se recogen distintas combinaciones de superficies absorbentes para la pantalla en Y. En esta figura la línea de puntos indica un material con capacidad de absorción ($s=20.000 \text{ Nsm}^{-4}$) y espesor 10 cm que puede corresponderse con una fibra de vidrio de 35 Kg/m³ de densidad [16]. El terreno en todos los casos es perfectamente reflejante. La figura 17b 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.

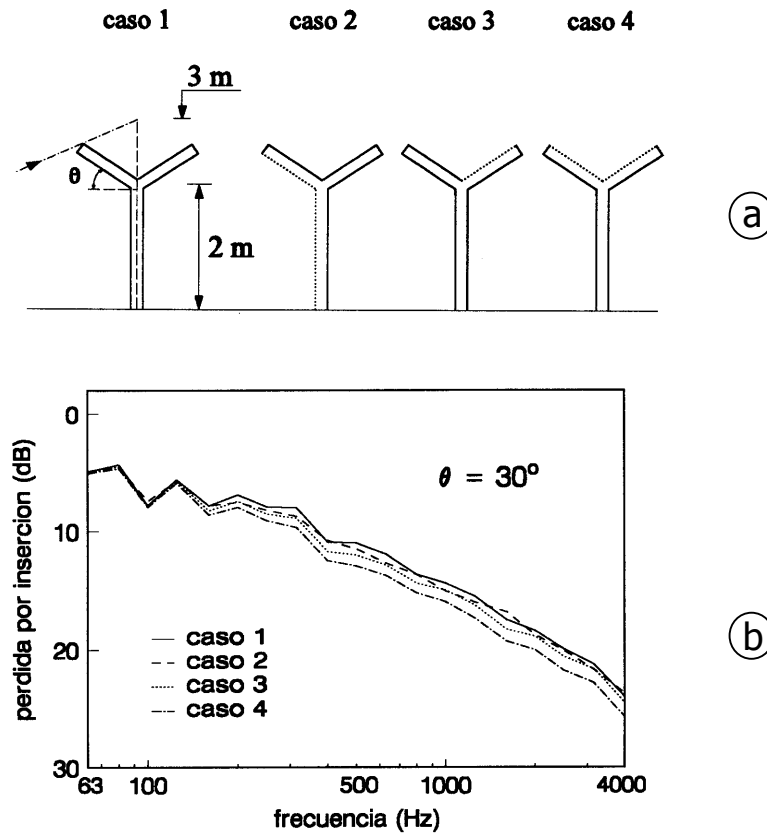


Figura 17a y b. Espectro de pérdida por inserción. Pantalla en Y. Influencia del tratamiento absorbente (..... $\sigma = 20.000 \text{ Nsm}^{-4}$, $e = 0.1\text{m}$).

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. Las 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 18) con $\theta=60^\circ$.

En la figura 19 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* (dB) como sigue:

$$AL = -20 \log \left| \frac{p_{SA}}{p_{SR}} \right| \quad (13)$$

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 podría corresponder con un terreno bien aireado 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:

$$IL_{SA} = IL_{SR} - AL_S + AL_{P.simple} \quad (14)$$

La figura 20 ratifica la validez de la aproximación (14) para la barrera en forma de dique de la figura 18.

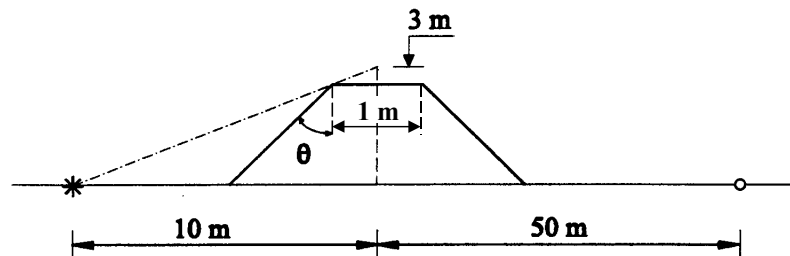


Figura 18. Pantalla en forma de dique. Tercer perfil propuesto para estudio de AL .

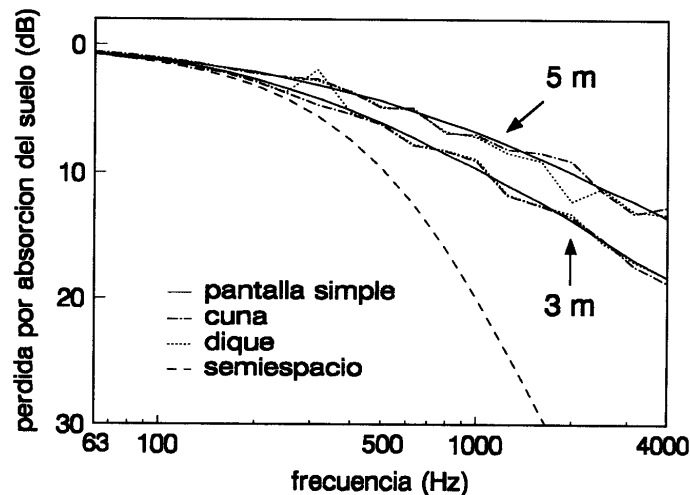


Figura 19. Espectros de pérdida por absorción del terreno.

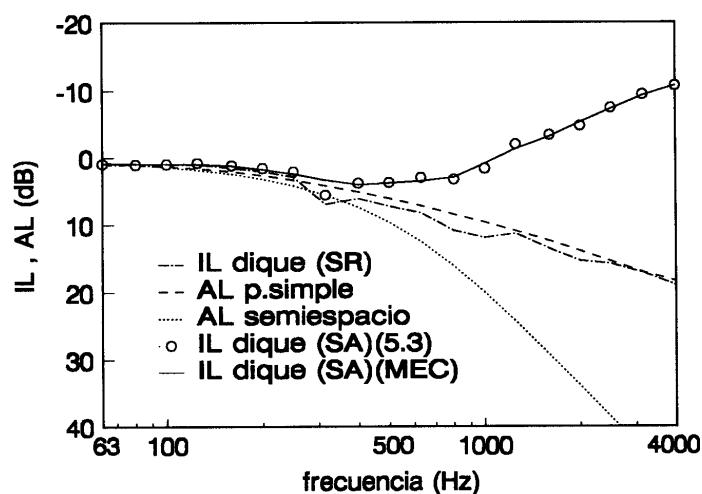


Figura 20. Espectro de pérdida por inserción. Sección transversal en dique sobre semiespacio absorbente. Validación del procedimiento aproximado.

PÉRDIDA POR INSERCIÓN ESPECTRAL

Es sencillo obtener el coeficiente de pérdida por inserción global para el espectro completo del ruido radiado. Para ello se ha utilizado un espectro normalizado representativo del ruido de tráfico (en la tabla siguiente se presenta el utilizado en este estudio). Para obtener el coeficiente de pérdida global partimos de los espectros de IL para la geometría en cuestión y los combinamos de acuerdo a la potencia emitida a cada frecuencia del espectro.

frecuencia (Hz)	SPL (dBA)
63	75.3
80	80.0
100	83.3
125	85.7
160	88.2
200	89.8
250	91.0
315	91.7
400	92.9
500	94.5
630	95.9
800	97.0
1000	98.1
1250	98.2
1600	98.0
2000	96.2
2500	93.8
3150	91.6
4000	89.0

Tabla 1. Espectro normalizado de ruido de tráfico.

En la figura 21 se representa, en forma de mapa de colores, el coeficiente de pérdida por inserción en las inmediaciones de una pantalla simple de 3 metros de altura. Las distancias

en abscisas y ordenadas están en metros. Las superficies de la pantalla y el contorno del semiespacio son acústicamente rígidos. La fuente se sitúa, como hasta ahora, a 10 metros de la barrera en el origen de la gráfica. En la base de la figura aparece la escala de color en dB. En esta figura, en aras a su interpretación inmediata, niveles inferiores de potencia acústica en relación con el problema de propagación libre en el semiespacio (sin pantalla) aparecen con signo negativo. Los colores fríos representan niveles acústicos inferiores provocados por el apantallamiento del obstáculo. Se aprecia claramente la zona de sombra situada tras la barrera y el mecanismo de eficacia de este tipo de pantallas.

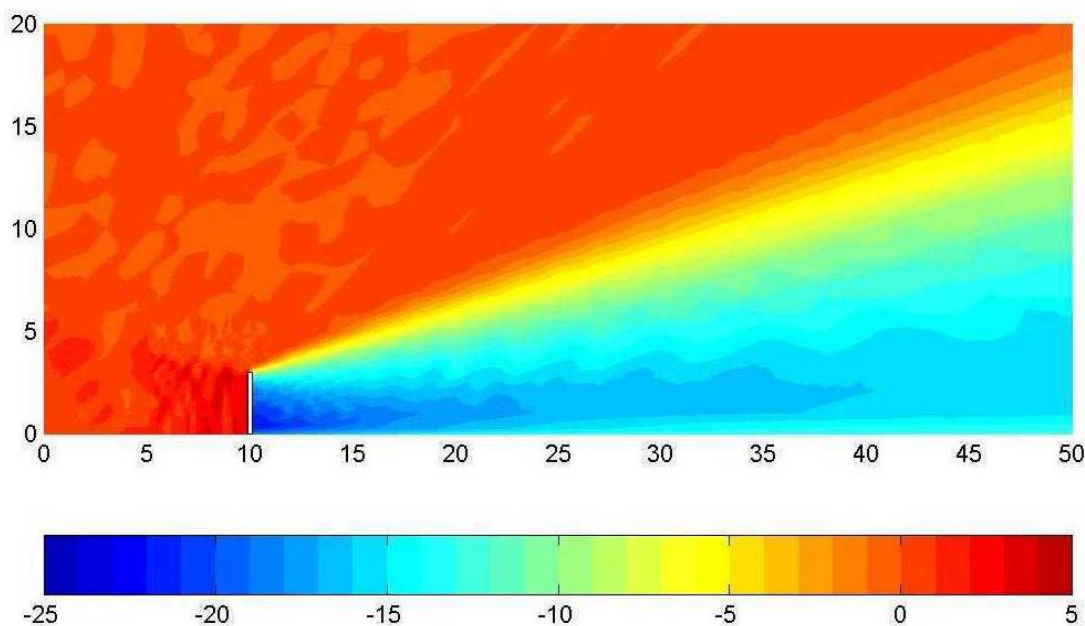


Figura 21. Mapa de reducción de impacto provocado por una barrera simple de 3 metros.
Superficies reflejantes

Los resultados para la barrera con sección en forma de cuña se presentan en la figura 22. Para la barrera en forma de dique la reducción de impacto se representa en la figura 23. Ambas barreras tienen una inclinación de 45° y 3 metros de altura efectiva. Todas las superficies son completamente reflejantes y la fuente se sitúa en el origen de coordenadas.

En ambos casos y en relación con la pantalla simple de igual altura efectiva (fig.21), se aprecia que el límite de la zona de sombra está algo menos definido. Como ya hemos comentado anteriormente, estas geometrías son más permisivas con la difracción de la potencia acústica. Asimismo, estas secciones favorecen la proyección vertical de la energía acústica, un efecto éste muy deseable cuando se apantallan ambos lados de la vía. Sobre este aspecto incidiremos en el próximo apartado.

Comparar ambos perfiles (cuña y dique) haciendo uso de estos mapas de color resulta algo más complicado, si bien se observa que en las pantallas en forma de dique aparecen valores algo mayores de reducción de impacto tras la barrera.

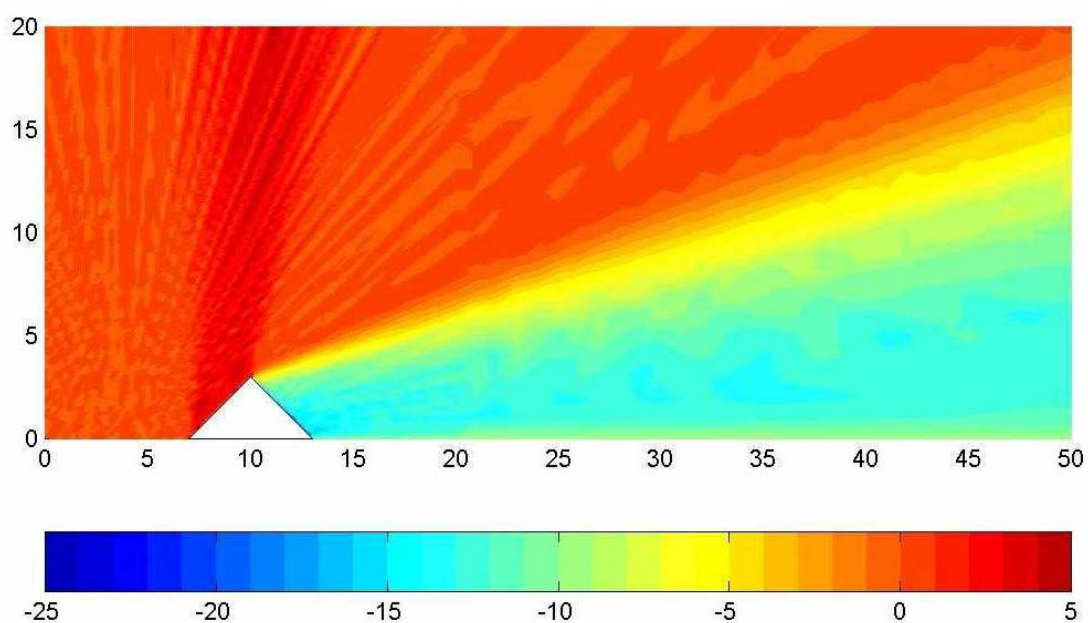


Figura 22. Mapa de reducción de impacto. Sección transversal en cuña (3 metros).
Superficies reflejantes

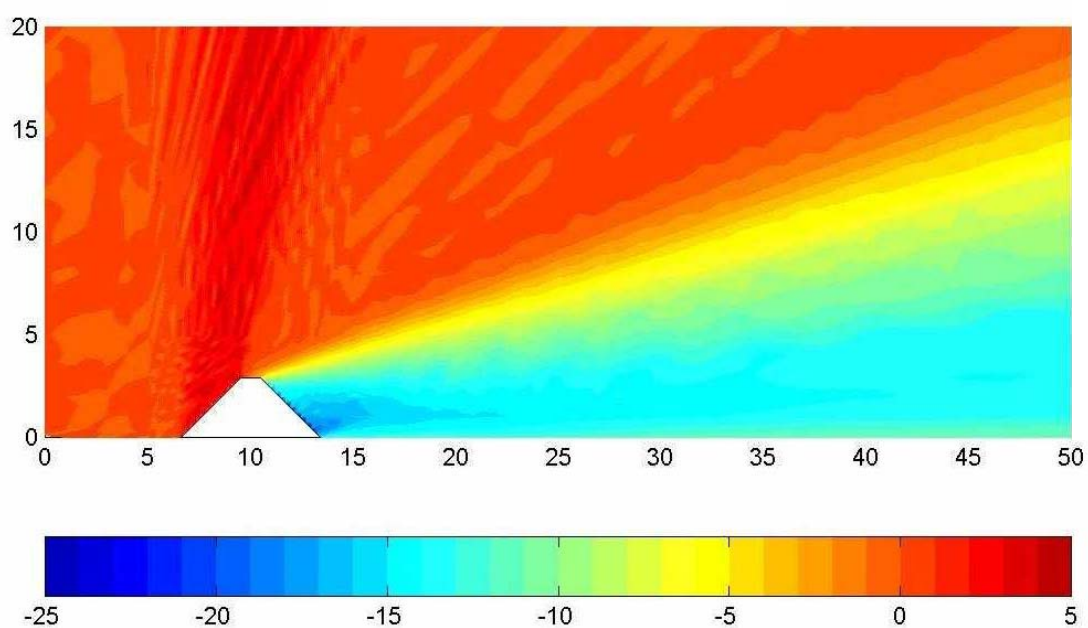


Figura 23. Mapa de reducción de impacto. Sección transversal en dique (3 metros).
Superficies reflejantes.

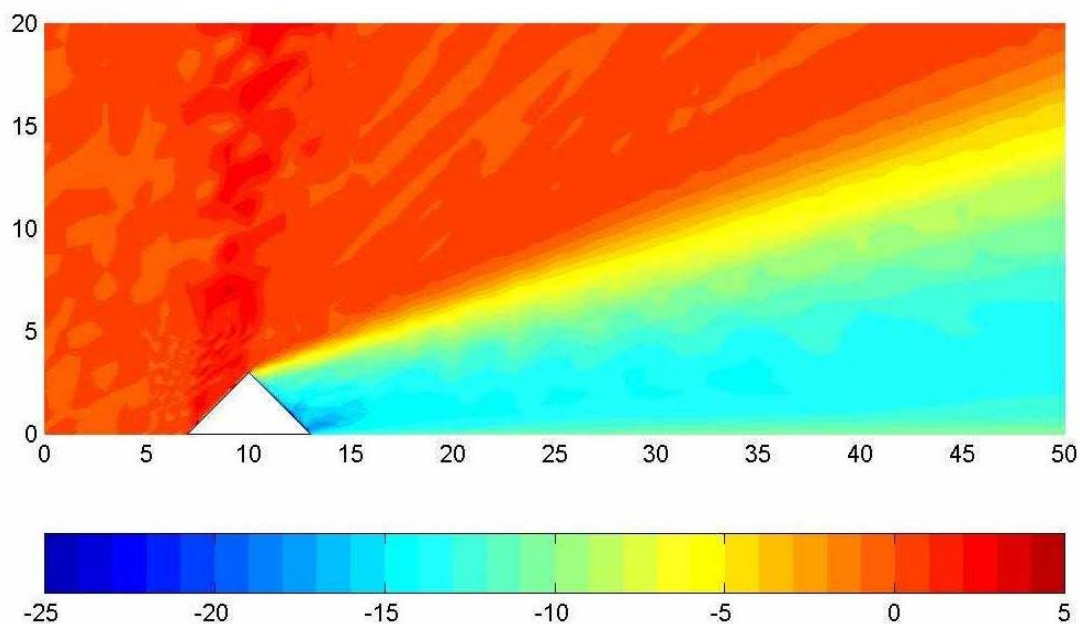


Figura 24. Mapa de reducción de impacto. Sección transversal en cuña (3 metros).
Superficies absorbentes ($\sigma = 300.000 \text{ Nsm}^{-4}$).

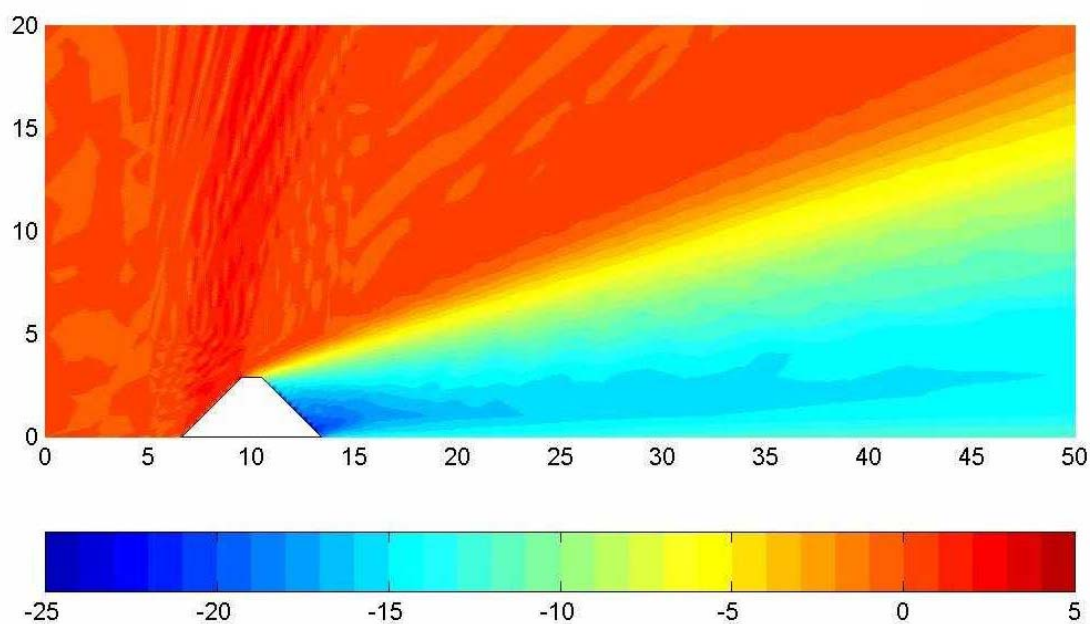


Figura 25. Mapa de reducción de impacto. Sección transversal en cuña (3 metros).
Superficies absorbentes ($\sigma = 300.000 \text{ Nsm}^{-4}$).

En las figuras 24 y 25 puede visualizarse la influencia que el tratamiento absorbente de las superficies de la barrera tiene en los resultados de pérdida para el espectro completo. Se ha considerado una resistividad $\sigma=300.000 \text{ Nsm}^{-4}$. Esto representaría, como hemos dicho, la

realización de los montículos con tierra y dotarles de cubierta vegetal. Comparando 24 con 22 se aprecia una reducción de los valores de la presión acústica en la zona de sombra de la barrera debido a la absorción en los contornos del obstáculo. Idéntica conclusión se extrae del análisis comparativo de las figuras para la barrera con sección transversal en forma de dique.

PANTALLAS A AMBOS LADOS DE LA FUENTE

La situación más frecuente en la práctica es la existencia de núcleos urbanos que hay que proteger a ambos lados de la vía de tráfico. En estos casos es frecuente adoptar como solución disponer pantallas en los dos lados de la carretera. Esta solución sin embargo requiere un análisis más detenido. En la figura 26 se presenta un esquema del problema asociado a esta disposición. Si pensamos por ejemplo en un receptor situado a la derecha de la calzada, vemos que el nivel de ruido que recibe puede alterarse debido a las reflexiones producidas por la pantalla que se encuentra al lado izquierdo de la fuente.

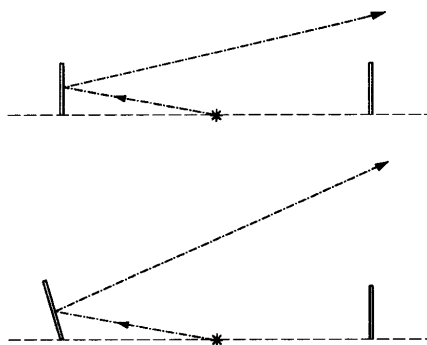


Figura 26. Doble apantallamiento de la fuente.

En el estudio del espectro para las monofrecuencias centrales de tercios de octava se producen en la zona entre pantallas complicados efectos de resonancia que tienen que ver con la distancia que las separa y la altura de las mismas. Para eliminar en parte este problema se ha considerado un suelo con una cierta capacidad absorbente que permite que el modelo se comporte de una forma algo más amortiguada. El tipo de terreno utilizado se caracteriza por $\sigma=300.000 \text{ Nsm}^{-4}$ (suelo blando con manto vegetal). Algunas de las configuraciones estudiadas se presentan en la figura 27a. Se trata de comparar el nivel de ruido que recibe un receptor situado a la derecha de la fuente, a 60 m de ella y a nivel del suelo, en el caso de doble apantallamiento, con respecto al nivel que se recibiría si sólo existiese la pantalla entre fuente y receptor. Es lo que en la figura 27b se ha denominado pérdida por la inserción de la segunda pantalla. Las superficies de ambas pantallas son completamente reflejantes.

En la curva correspondiente al caso 1 se observan los efectos de interferencia ya comentados. Se aprecia claramente que en este caso aumenta por término medio el nivel de ruido en el receptor (la inclusión de la segunda barrera ha empeorado la situación en esta zona). En las curvas de los casos 2 y 3 se observan menores efectos de interferencia, lo que es lógico porque la disposición de las barreras permite ahora que escape más energía entre ellas. No existen diferencias muy significativas entre los resultados de los casos 2 y 3 con los que habría si no existiese la segunda barrera. La solución de inclinar la barrera

izquierda es por tanto una buena estrategia para disminuir el ruido a la derecha de la calzada, lo que se debe sin duda a que la barrera inclinada refleja las ondas más lejos de nuestra zona de interés. Una segunda conclusión es que, evidentemente, si se quiere proteger núcleos de población a ambos lados de la carretera, es preferible adoptar soluciones con dos barreras inclinadas, como las correspondientes al caso 3.

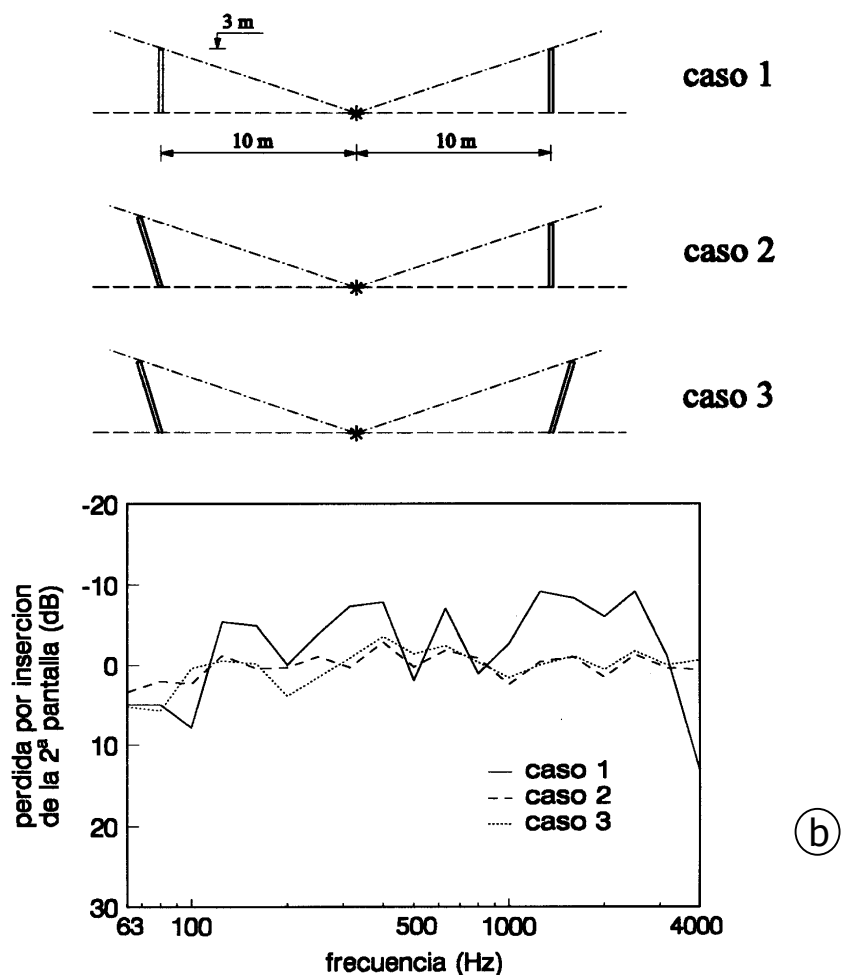


Figura 27a y b. Doble apantallamiento. Espectros de pérdida por inserción de la segunda pantalla.
Suelo absorbente (----- $\sigma = 300.000 \text{ Nsm}^{-4}$)

En la figura 28 presentamos el mapa de reducción de impacto para el caso de doble apantallamiento vertical. Los contornos de las barreras y el semiespacio son completamente reflejantes en este problema. La fuente se sitúa en el origen de coordenadas y al tratarse de un problema con simetría sólo representaremos la mitad situada a la derecha del emisor. Comparando estos resultados con los correspondientes al apantallamiento a un lado de la fuente (fig. 21) se observa una reducción en la altura de la zona de sombra tras la barrera lo cual representa un claro perjuicio para los receptores situados en altura. Asimismo, a distancias medias, es evidente el aumento de los niveles de impacto tras el obstáculo provocadas por el doble apantallamiento. Se aprecia, por otra parte, un encajonamiento de la energía acústica entre las barreras, con zonas que superan los 5 dB en relación con la situación sin apantallamiento. Un efecto similar, aunque más acusado, se presenta en las

calles de nuestras ciudades debido a la presencia de edificios a ambos lados de la calzada. Este efecto de “cañón acústico” puede reducirse con tratamientos absorbentes en las fachadas o realizando un diseño escalonado de los edificios en altura.

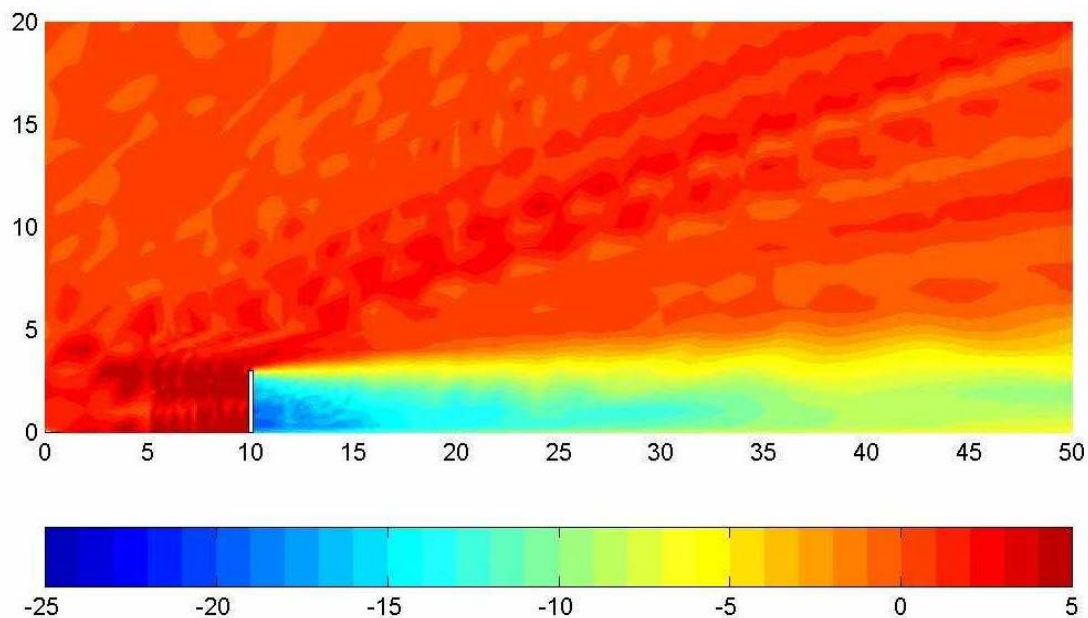


Figura 28. Mapa de reducción de impacto para doble apantallamiento vertical. Superficies reflejantes.

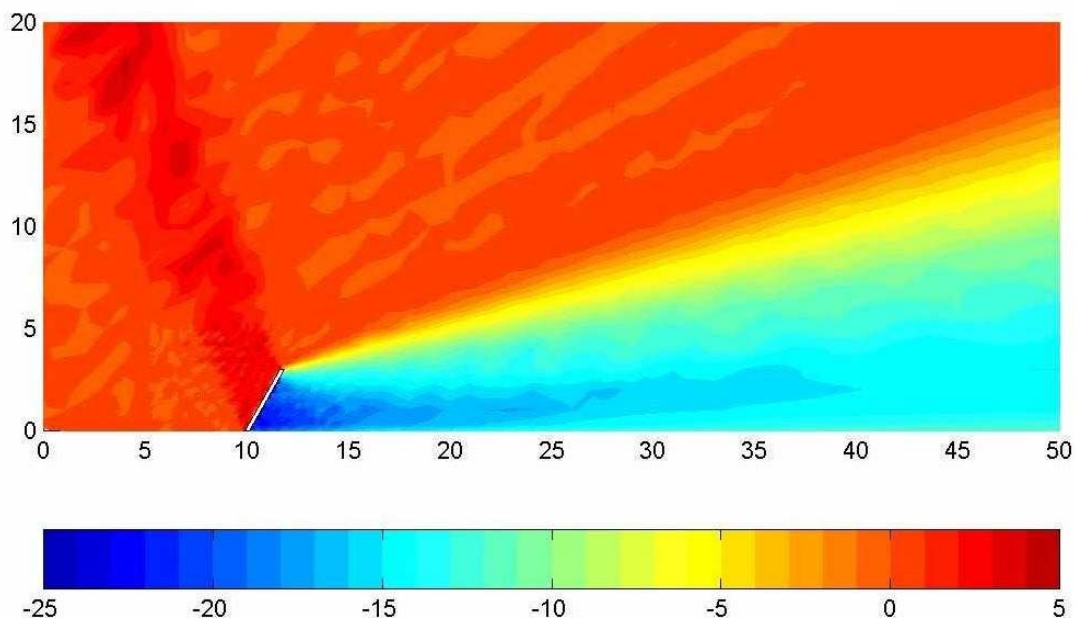


Figura 29. Mapa de reducción de impacto con doble apantallamiento inclinado (60°).
Superficies reflejantes.

Comparando las figuras 28 y 29 se observa claramente la mejora que supone el dotar a las pantallas de cierto grado de inclinación (hacia el receptor) cuando se intentan proteger ambos lados de la vía. Esto ya se presentó en forma de espectro de pérdida al inicio de este apartado. En la figura 5.40 se aprecia la proyección hacia arriba de la potencia acústica. En este caso, regiones entre las barreras por encima de 15 metros presentan incrementos de impacto superiores a 5 dB respecto de la situación sin barrera. Como es lógico, en puntos cercanos a la calzada el nivel acústico es inferior respecto al supuesto de doble apantallamiento vertical estudiado antes.

OTRAS ACTUACIONES: VIAS ELEVADAS Y VIAS DEPRIMIDAS

Estudiaremos en este apartado algunas otras actuaciones que permiten reducir el impacto acústico en el entorno de la vía. Así, analizaremos el comportamiento acústico de medidas como elevar o deprimir la carretera respecto del terreno circundante. Ambas soluciones consiguen niveles inferiores de ruido al nivel del suelo que el caso de carreteras a la misma cota que el receptor. A diferencia de las pantallas acústicas, este tipo de actuaciones afecta de forma importante al diseño de la vía y su entorno, si bien los fundamentos acústicos ligados a la efectividad de estas medidas son semejantes a los ya comentados.

Existen bastantes estudios en la literatura sobre las ventajas de la carretera en trinchera (vía deprimida respecto del terreno circundante). Sin embargo existen menos datos sobre la eficacia anti-ruido de las carreteras elevadas (terraplenes y viaductos). El uso de los viaductos, por ejemplo, no es frecuente como estrategia de disminución de ruido sino más bien como solución a problemas de accesos en la confluencia de muchas vías. Aun así se trata de una solución que ha sido empleada con éxito en países como Japón o Italia como estrategia de disminución de ruido ambiente. Asimismo, los estudios realizados en estos países demuestran que el apantallamiento de este tipo de vías resulta más efectivo que el que se realiza al nivel del suelo, siendo más fácilmente integrable, desde el punto de vista estético, en el diseño del viaducto.

CALZADAS ELEVADAS

El primer modelo que se estudia es el correspondiente a una carretera en viaducto. Se ha diseñado un problema simplificado consistente en una vía recta y de sección constante de 10 m de ancho, que se encuentra a una altura H variable. La idea se ilustra en la figura 30a. La fuente se ha situado en el centro de la calzada, 10 cm por encima de la misma, y el receptor se encuentra al nivel del suelo y a una distancia horizontal de 60 m desde la fuente. Para aislar el efecto de la altura de la calzada de cualquier otro factor todas las superficies se consideran completamente reflejantes. La figura 30b recoge los resultados de la pérdida por elevación de la calzada, esto es, la diferencia de ruido en dB entre el caso de una vía elevada ($H=5, 10$ ó 15 m) y el caso de la vía a nivel de suelo ($H=0$ m). Se aprecia que el ruido en el receptor disminuye conforme aumenta la altura del viaducto. Ello se debe a la conjunción de dos factores: por un lado la distancia entre fuente y receptor crece con H . Por otro, el aumento de H va ligado a que la propia calzada apantalla cada vez más la propagación de la onda incidente. Este efecto es más acusado a frecuencias altas, puesto que en las ondas de baja frecuencia la difracción es mayor.

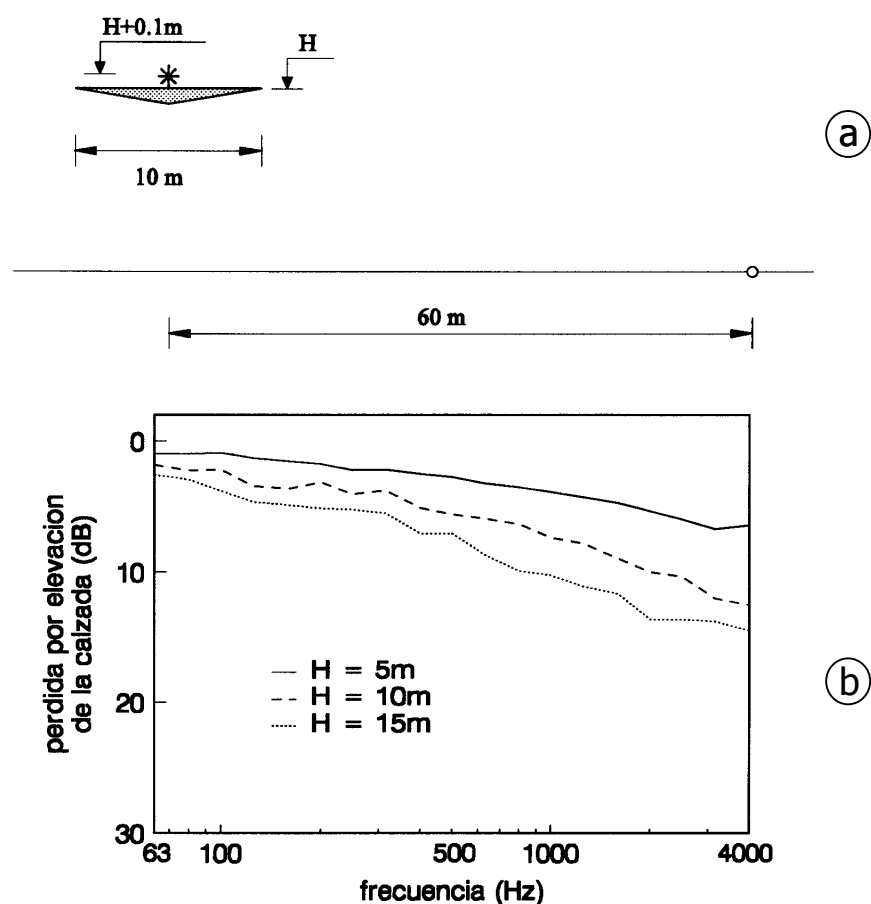


Figura 30a y b. Espectros de pérdida por elevación de la calzada. Superficies reflejantes.

En la figura 31 se presenta la configuración estudiada para una carretera en terraplén. El ancho de la plataforma es 20 metros (no todos ocupados por la calzada) y se eleva 3 metros por encima del nivel del terreno. La fuente de ruido se sitúa a nivel de dicha plataforma y en el centro de la misma.

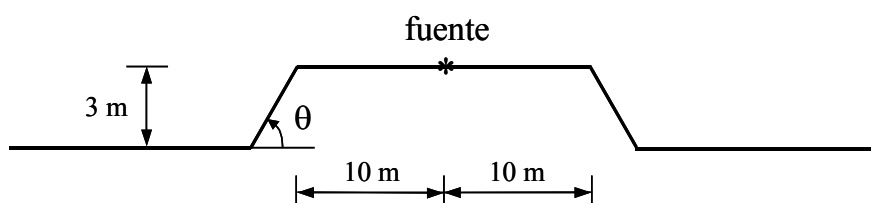


Figura 31. Geometría vía elevada en terraplén.

En la figura 32 se presenta el mapa de reducción de impacto provocado por esta medida para una inclinación del talud $\theta=60^\circ$. La situación de referencia para determinar la reducción de impacto es aquella en la que no existe terraplén y la fuente se encuentra situada a nivel del terreno circundante. En este primer modelo tanto la plataforma como los taludes y el terreno circundante se han considerado contornos completamente reflejantes.

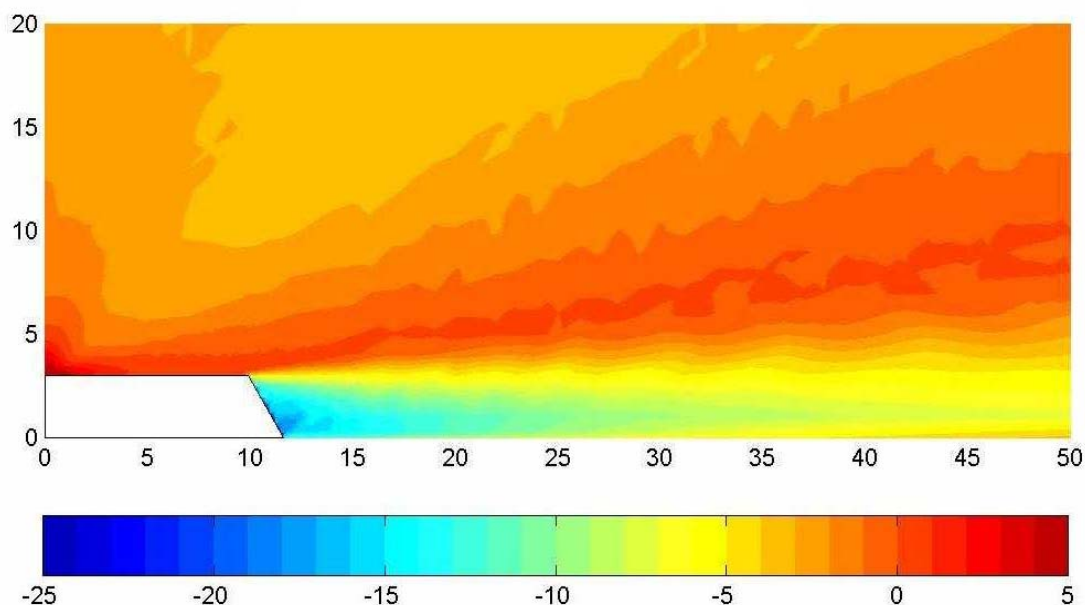


Figura 32. Mapa de reducción de impacto para una vía en terraplén. Superficies reflejantes.

La figura 33 representa la variación espacial del coeficiente IL en puntos situados en una recta a 1.5 metros del nivel del suelo. Se presentan cuatro curvas correspondientes a diferentes inclinaciones de los taludes del terraplén, $\theta=0^\circ$ (taludes verticales), 30° , 60° y 90° . La distancia horizontal abarcada por esta gráfica se extiende hasta 110 m. de la fuente de ruido. Se extrae como conclusión que la efectividad mayor, en términos generales, la presenta el terraplén con paredes verticales.

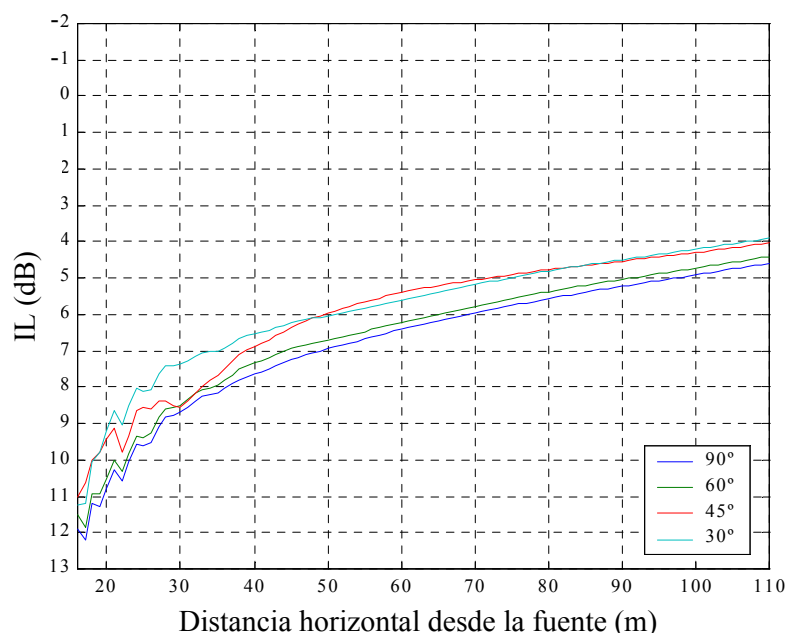


Figura 33. Pérdida por elevación de la vía en terraplén. Superficies reflejantes.

Introducimos ahora cierta capacidad absorbente a los taludes del terraplén. Como era de esperar, la reducción del impacto acústico por este motivo es considerable. Así, la figura 34 representa la reducción de ruido para un terraplén con $\theta=60^\circ$ y taludes realizados con tierra

y provistos de cubierta vegetal. Este modelo podría representar adecuadamente la realidad de este tipo de medidas. La situación de referencia continua siendo la representada por la fuente a nivel del terreno circundante y los contornos completamente reflejantes. La simple observación de esta figura y su comparación con la correspondiente a contornos reflejantes (fig.32) nos confirma lo que esperábamos. En este caso la reducción en la franja de 0 a 3m. del nivel del suelo supera los 10 dB. Ésta es una reducción de impacto considerable.

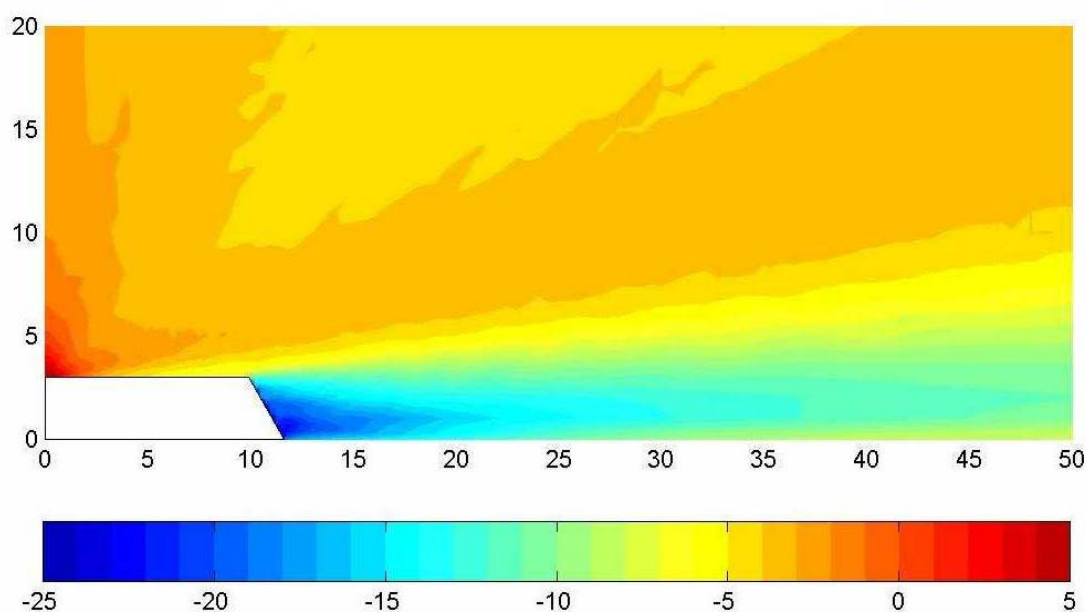


Figura 34. Mapa de reducción de impacto para una vía en terraplén.
Taludes absorbentes ($s = 300.000 \text{ Nsm-4}$).

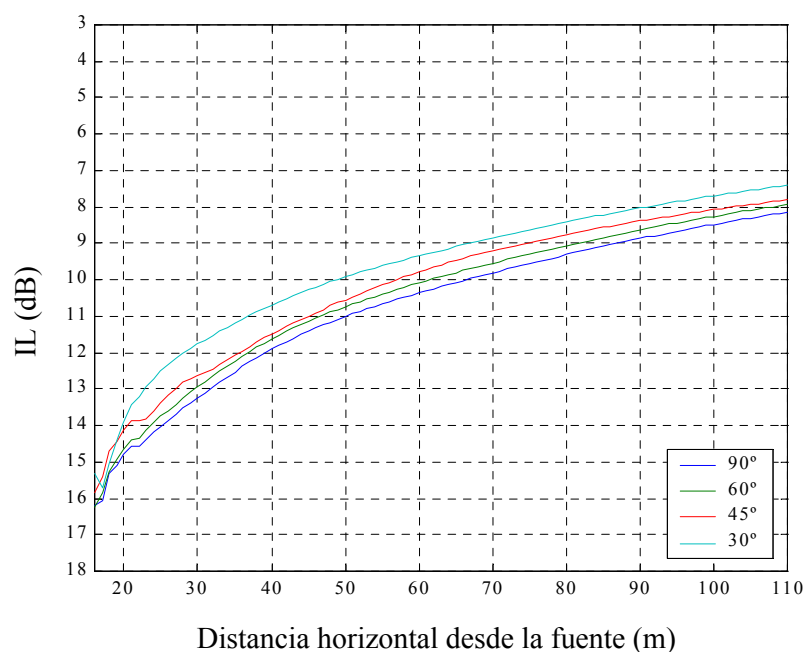


Figura 35. Pérdida por elevación de la vía en terraplén. Taludes absorbentes ($s = 300.000 \text{ Nsm-4}$).

En la figura 35 hacemos una representación análoga a la correspondiente a la figura 33.

Como antes, la medición se realiza en puntos a 1.5 metros del nivel del terreno. Las conclusiones no varían. En este caso la disminución del impacto supera los 7 dB para todas las geometrías a 110 metros de la fuente.

VÍAS DEPRIMIDAS

Se trata de la situación en que 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, 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 36) 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_1) 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 puede hacerse uso de cualquier tipo de solución fundamental. 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 [3] puede verse en detalle este procedimiento.

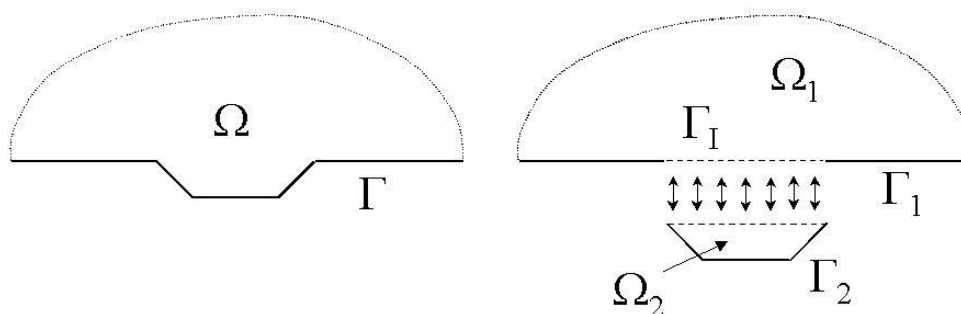


Figura 36. Vías deprimidas y procedimiento de resolución mediante subregiones.

Siguiendo este esquema se ha analizado la geometría de la figura 37. Se trata de una vía atrincherada con 20 metros de plataforma y 3 metros de profundidad. La inclinación de los taludes (θ) es, en general, variable. La fuente se sitúa en el centro geométrico de la plataforma y su emisión se caracteriza por el espectro de ruido de tráfico utilizado hasta el momento. El problema de referencia es el correspondiente a una fuente pulsando en el semiespacio (ausencia de trinchera).

Los resultados de reducción de impacto debidos a esta medida se muestran en el mapa de color de la figura 38 para una inclinación de los taludes $\theta=60^\circ$. La fuente de ruido se sitúa en el punto de coordenadas (0,-3). En este primer caso todos los contornos del modelo son completamente reflejantes. Debido a la simetría del problema sólo se representa la mitad de la geometría.

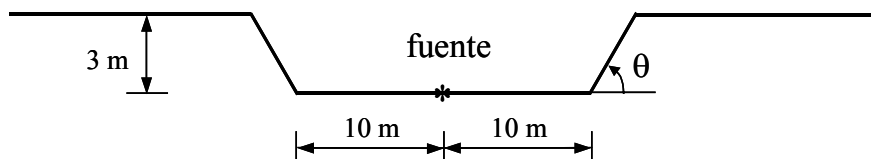


Figura 37. Geometría vía en trinchera.

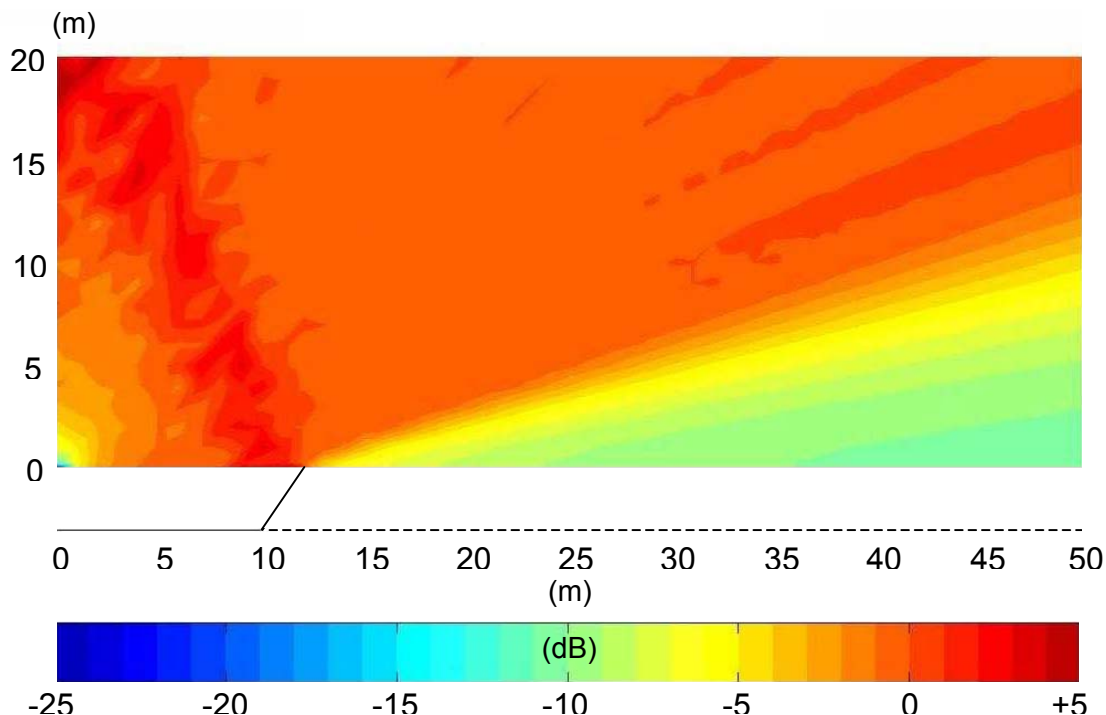


Figura 38. Mapa de reducción de impacto para una vía en trinchera. Superficies reflejantes.

La situación de referencia para determinar la reducción de impacto representada, es la correspondiente a un semiespacio a cota cero con una fuente pulsando en el origen de coordenadas. Es por ello que no existen valores representables en puntos de la subregión correspondiente a la depresión. Analizando cualitativamente la respuesta de esta medida, son indudables las analogías con la correspondiente a un doble apantallamiento con la misma inclinación.

La figura 39 representa la pérdida debida al atrincheramiento de la fuente para puntos situados a cota 1.5 metros desde el nivel del suelo. Se han estudiado geometrías con inclinaciones del talud de 30°, 45°, 60° y 90°. Puede concluirse que el aumento de la pendiente del talud de la trinchera mejora su comportamiento acústico. Ocurre algo similar a lo comentado respecto a la eficacia de pantallas en forma de cuña o dique. Una menor pendiente favorece la difracción del sonido y su salida de la trinchera. Este análisis ha de ser revisado, sin embargo, cuando nos enfrentamos a la trinchera con paredes verticales. En este caso, la reducción del impacto acústico apenas es perceptible (inferior a 1 dB). Aquí, las reflexiones en la pared de la trinchera que se encuentra al otro lado de la fuente

aumentan el nivel de ruido percibido en esta zona.

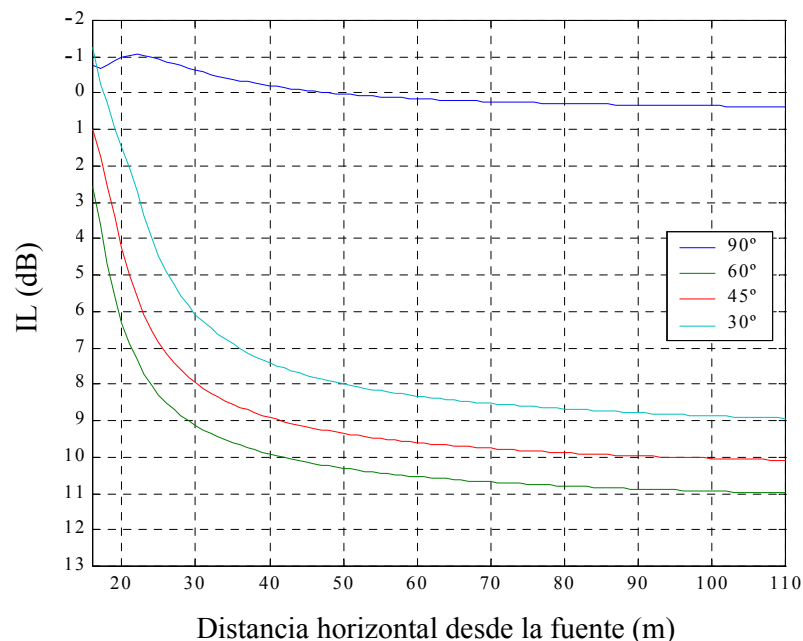


Figura 39. Pérdida por depresión de la vía. Superficies reflejantes.

Esta situación para trincheras con $\theta=90^\circ$, puede mejorar de forma sensible si sus paredes tienen cierta capacidad absorbente. En este sentido, la figura 40 presenta los resultados obtenidos también en puntos situados a 1.5 metros del nivel de terreno cuando los taludes aportan una capacidad absorbente caracterizada por una resistividad $\sigma=300.000 \text{ Nsm}^{-4}$ (terreno vegetal).

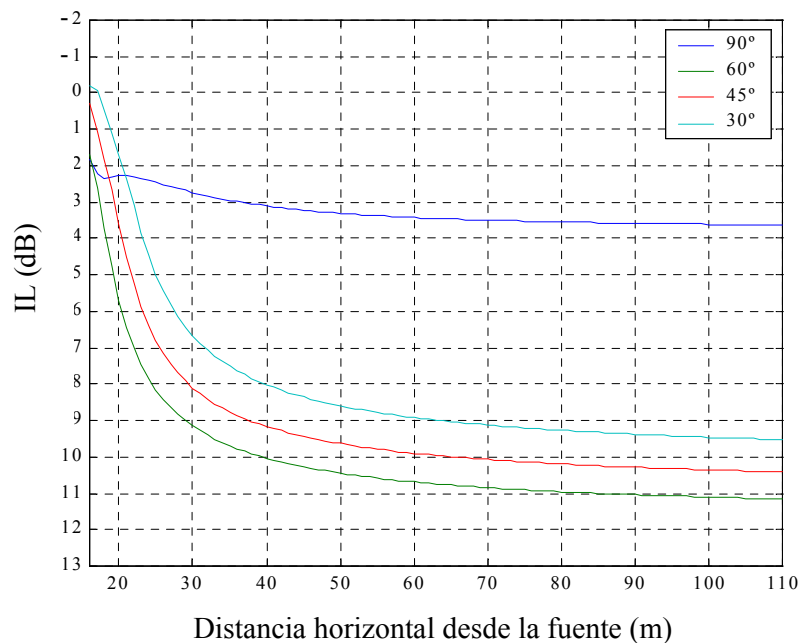


Figura 40. Pérdida por depresión de la vía. Taludes absorbentes ($s = 300.000 \text{ Nsm}^{-4}$).

La inclusión de tratamiento absorbente en los taludes mejora el comportamiento del modelo

de forma más acusada cuanto menos inclinada sea la pendiente del talud. De cualquier forma, la reducción del nivel de ruido por este motivo no supera 1 dB en el mejor de los casos ($\theta=30^\circ$). Por el contrario, y como ya esperábamos, para $\theta=90^\circ$ la reducción de impacto por este motivo es más acusada y alcanza 3 dB a 40 metros de la fuente.

REFERENCIAS

- [1] Varios, *Reducción del ruido en el entorno de las carreteras*, OCDE, Ministerio de Obras Públicas, Transpone y Medio Ambiente (1995).
- [2] Domínguez, J., *Boundary Elements in dynamics*, CMP Elsevier (1993).
- [3] Maeso, O. y Aznárez, J., *Estrategias para disminuir el impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del Método de los Elementos de Contorno*. Editado por los autores. ISBN 84-89728-98-4. Las Palmas de G.C. (2004).
- [4] Perdomo, F., Aznárez, J.J. y Maeso, O., *Aplicación del MEC en la evaluación de medidas para reducir el impacto acústico en el entorno de carreteras*, Revista de Acústica, 23 (1,2), pp. 13-19 (2002).
- [5] Seznec, R., *Diffraction of sound around a barrier: use of the boundary elements technique*, J. Sound and Vibration, 73, 195-209 (1980).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] Crombie, D.H. y Hothersall, D.C., *The performance of multiple noise barriers*, J. Sound and Vibration, 176(4), 459-473 (1995).
- [9] Antes H., *Applications in enviromental noise, Boundary Element Methods in Acoustics*, Ciskowski & Brebbia Ed., CMP Elsevier (1995).
- [10] Watts, G.R., *Acoustic performance of parallel traffic noise barriers*, Applied Acoustics, 47(2), 95-119 (1996).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Ballesteros, R., Ramos, C. y Parrondo, J.L., *Modelización del campo de presión sonora en la proximidad de una pantalla de aislamiento acústico*, Proc. Jornadas

Nacionales de Acústica, Tecniacústica 96 (1996).

[14] Estellés, H., Cervera, F. y Rubio, C., *Análisis de una barrera acústica absorbente*, Proc. Jornadas Nacionales de Acústica, Tecniacústica 96 (1996).

[15] Barti, R. y Servera, J., *Estudio acústico de barreras*, Proc. Jornadas Nacionales de Acústica, Tecniacústica 95 (1995).

[16] Delaney, M.E. y Bazley, E.N., *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, Applied Acoustics, 3, 105-116 (1970).

[17] Rasmussen, K.B., *Sound propagation over non-flat terrain*, Danish Acoustical Laboratory Rep.No.35, The Danish Academy of Technical Sciences (1982).