

PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO DE TRÁFICO: ¿ PANTALLAS O CARRETERAS EN TRINCHERA?

REFERENCIAS PACS: 43.20.Gp, 43.50.Gf, 43.50.Vt

Salas, R.A.; Simón, F.; Pfretzschner, J.
Instituto de Acústica, CSIC.
Serrano 144
28006 Madrid

ABSTRACT

A comparative study between the acoustic protection produced by the diffraction around corners and screens is described.

Among the algorithms proposed by different authors for a rigid wedge, we have selected those of Pierce due to the practical advantages of numerical calculation. Pierce offers two approximations to the diffraction for a rigid wedge: one based in terms of auxiliary Fresnel functions by means of complex variable techniques, and a simplified version based on the asymptotic series of the Fresnel diffraction functions.

It has been described the spatial zones in which both formulations can be used, especially the spatial limits for the second one.

The article concludes showing that, in general, the acoustic protection provided by a screen is higher than those provided by a rigid corner with the same effective height.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un número relativamente elevado de programas informáticos utilizados para la resolución de problemas "topográficos" de ruido ante una situación establecida, o bien para proceder a una distribución racional de viales y áreas de distinto uso (habitables, comerciales, etc.), que ayudan al diseñador o urbanista, a tomar posibles iniciativas y soluciones.

Los programas, basados en la teoría acústica de rayos y valoraciones energéticas, tienen en cuenta los posibles canales de propagación acústica y distribuciones energéticas como consecuencia de atenuaciones por la distancia, reflexiones en obstáculos y difracciones en el caso de encontrarse o prever la instalación de pantallas antirruído con finalidades de protección acústica.

Normalmente, ninguno de los programas a los que se ha tenido acceso, consideran la difracción por diedros, como ocurre con las esquinas de edificaciones y sobre todo con los desniveles del terreno en forma de trinchera, por la que podría instalarse una hipotética carretera. No es raro encontrar en la literatura la afirmación concluyente que una carretera en trinchera presenta análogas características de protección acústica que la suministrada por una pantalla de altura equivalente.



El objetivo de este trabajo consiste en realizar un estudio comparativo del grado de protección acústica entre pantallas acústicas delgadas y trincheras, ambas con alturas eficaces equivalentes, a partir de algoritmos de reconocida solvencia.

Los resultados de este estudio pueden servir al diseñador con ideas de magnitud, así como soluciones mas viables bajo el punto de vista acústico, de un problema de esta naturaleza.

ASPECTOS TEÓRICOS

Los trabajos sobre la difracción acústica producida por diedros o cuñas no son excesivamente abundantes [1...4], y son los de Pierce [6-8] los que presentan un mayor interés, constituyendo una referencia obligada en trabajos posteriores, por ejemplo [9]. Otro aspecto que los hace esenciales es su comprobada eficacia en medidas experimentales.

Pierce establece un modelo que partiendo de una generalización de las soluciones exactas establecidas por Sommerfeld son interpretadas siguiendo las teorías establecidas por J.B. Keller (GTD) en forma de soluciones asintóticas uniformes para el problema de difracción por una cuña, apoyadas en las funciones auxiliares de Fresnel, con un tratamiento del problema con técnicas de variable compleja.

La expresión para las pérdidas de inserción, IL , propuesta por Pierce, válida para $kr_0 \gg 1$ y $kr \gg 1$ suponiéndose fuente puntual, es (figura 1) :

$$IL = -10 \log \left\{ \frac{d_0^2}{2(r+r_0)^2} \left[\sum_{+,-} \frac{\text{sen } n\mathbf{p}}{\sqrt{1 - \cos n\mathbf{p} \cos n(J_0 \pm J)}} A_D(\Gamma M_n(J_0 \pm J)) \right]^2 \right\} \text{ (dB)} \quad (1)$$

siendo : $n = p/b$ (índice de cuña) con b ángulo exterior $k=2\pi f/c$ número de onda, d_0 la distancia directa fuente – receptor y $A_D(X)$ es la función integral de difracción, que en el caso de que el argumento X sea real se define como $A_D(X) = \text{sign}(X) \{ f(|X|) - ig(|X|) \}$ donde $f(X)$ y $g(X)$ son las integrales de Fresnel, siendo:

$|X_{\pm}| = |\Gamma M_v(J_0 \pm J)|$, función que depende de las coordenadas polares del emisor y del receptor, en la que:

$$M_n(J_0 \pm J) = \frac{\cos n\mathbf{p} - \cos n(J_0 \pm J)}{n \sqrt{1 - \cos n\mathbf{p} \cos n(J_0 \pm J)}} \text{ y } \Gamma = \sqrt{\frac{kr_0 r}{p(r_0 + r)}}$$

Sin embargo, estos complicados algoritmos de cálculo pueden simplificarse para situaciones en la zona de sombra, en las que $q < q_0 - p$, que cumplan que $kr \gg 1$, $kr_0 \gg 1$ y valores suficientemente grandes del ángulo de incidencia ($q_0 > 5p/4$) y ángulos de difracción $< p/2$ para cuñas con un ángulo exterior $b = 3p/2$.

En este caso, las funciones de Fresnel f y g pueden sustituirse por los primeros términos de sus desarrollos en serie : $f(X) @ 1/(pX)$ y $g(X) @ 1/(p^2 X^3)$, para valores suficientemente grandes del argumento X , (Pierce toma el valor $X > 2$). Además sucede que, para $X > 2$, la función $g(X) @ 0$ más rápidamente que $f(X)$, con lo que la parte imaginaria de la función $A_D(X)$ se hace despreciable, obteniéndose

$$A_D(\Gamma M_v(J_0 \pm J)) \approx \frac{1}{p \Gamma M_v(J_0 \pm J)} \quad (2)$$

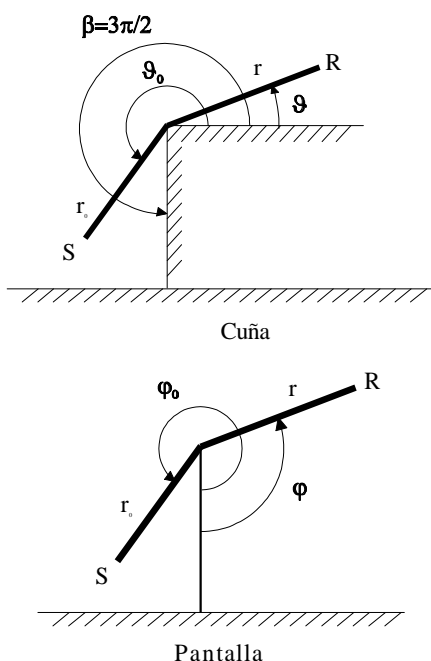


Fig 1. Cuña en ángulo recto y pantalla de igual altura.



Sustituyendo la ecuación (2) en (1) se obtiene para las pérdidas de inserción de una cuña con ángulo exterior b la expresión compacta aproximada :

$$IL = -10 \log \left\{ \frac{Id_0^2}{4b^2 r_0 r (r_0 + r)} \left[\frac{\text{sen} np}{\cos np - \cos[n(J_0 + J)]} + \frac{\text{sen} np}{\cos np - \cos[n(J_0 - J)]} \right]^2 \right\} \text{ (dB)} \quad (3)$$

donde los valores suministrados por la ecuación (3) son similares a los de la ecuación (1) cuando se cumple la relación

$$|X_{\pm}| = |\Gamma M_v(J_0 \pm J)| > 2 \quad (4)$$

que equivale a:

$$rr_0/(r+r_0) > C(\theta, \theta_0, f) \quad (5) \text{ siendo}$$

$$C = \frac{16p}{9k} \left\{ \frac{1 - \cos \frac{2}{3} p \cos \frac{2}{3} (J_0 - J)}{\left[\cos \frac{2}{3} p - \cos \frac{2}{3} (J_0 - J) \right]^2} \right\}$$

una función que depende de la posición angular del emisor J_0 , del receptor J y de la frecuencia, y donde se ha sustituido $n=2/3$ (cuña ángulo recto). En general, la condición anterior (4) no se cumple para posiciones muy cercanas de ambos al vértice difractor y/o para ángulos de emisión rasantes y posición del receptor en la superficie de la cuña. Además, la ecuación (1), es compleja de evaluar si no se dispone de tablas ó de un programa específico de ordenador; sin embargo la ecuación (3) resulta más asequible al usuario no especializado. Los resultados obtenidos a través de la expresión (3) son similares a los de (1) cuando se cumple la relación (4) (criterio de Pierce) que es equivalente a la (5).

Si se estudian las regiones de q en la que es válida la relación (5), se distinguen tres zonas o sectores angulares, como se ve en la figura 2.

Zona de Iluminación directa (ZID): $q > q_0 - p$.

Zona de Sombra (ZS): $0 < q < q_{\text{limite}}$, donde $0 < q_{\text{limite}} < q_0 - p$. En esta región la diferencia de los valores suministrados por ambas expresiones es muy pequeño. (Se cumple el criterio elegido por Pierce).

Zona de Penumbra (ZP): Situada entre las anteriores. En esta zona la diferencia de los valores suministrados por ambas expresiones es grande, por lo que se aconseja la utilización de la ecuación (1) para evaluar las Pérdidas de Inserción.

Dado que determinadas posiciones del emisor y del receptor pueden condicionar el empleo de las expresiones (1) y (3), en el apéndice se presenta un ejemplo aclaratorio.

Es bien conocida, por otra parte, la expresión de J. B. Keller para el cálculo de las pérdidas por inserción en pantallas semi – infinitas, así como sus limitaciones para valores del número de Fresnel, $N < 1$, lo que significa posiciones muy próximas al borde difractor:

$$IL = -10 \log \left\{ \frac{d_0^2}{8pk r_0 r (r_0 + r)} \left[\frac{1}{\cos \frac{J_0 - J}{2}} + \frac{1}{\cos \frac{J_0 + J}{2}} \right]^2 \right\} \text{ (dB)} \quad (6)$$

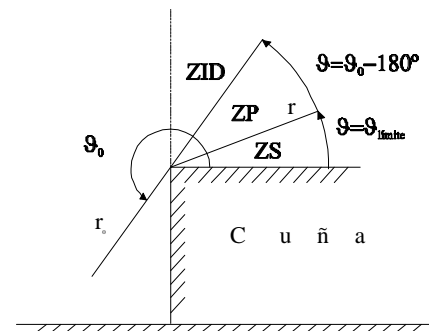


Figura 2. Zonas de utilización de las diversas formulaciones.

Ambas expresiones (3 y 6) presentan dos términos en los que el primero corresponde a las pérdidas o atenuación por divergencia esférica, y el segundo a atenuaciones según el ángulo de recepción, para una posición angular fija de emisión equivalente a la directividad de una fuente secundaria radiando desde el borde del obstáculo.

Los primeros términos son idénticos para ambos casos, excepto en los coeficientes $1/(4p)^2$ y $1/(3p)^2$ lo que conlleva a correspondientes valores en la ec.(3) inferiores a la ec.(6). El estudio empírico de las funciones transcendentales asociadas a las directividades, muestra curvas análogas en el intervalo $p/2 < j < p$ aunque, análogamente al caso anterior, los valores de la directividad correspondientes al caso 3 son mayores que los del caso 4, de lo que puede concluirse que, para el caso ideal de ambas situaciones, las pantallas acústicas siempre producirán mayores pérdidas de inserción que las cuñas (o desniveles) de altura equivalente.

Es interesante resaltar que las ecuaciones 3 y 6 resultan idénticas, cuando la cuña degenera en un plano ($v = 1/2$), convirtiéndose en una pantalla plana semi-infinita.

Con objeto de establecer órdenes de magnitud de esta situación, en la figura 3 se muestra a modo de ejemplo la diferencia $IL_{pantalla} - IL_{cuña}$ expresada en dB para las siguientes situaciones: $h_s=0.5$; $s=3$; $H=3$; $h_r= 3, 6, 12, \text{ y } 24 \text{ m}$ (curvas a, b, c y d respectivamente) para valores de r entre 0 y 150 m. Estos parámetros corresponden a la situación del emisor (h_s, s) y receptor (h_r, r) referida a la pantalla (H) o borde vertical del talud. En este caso se ha utilizado la formulación de Pierce, ecuación (1) para el caso de la cuña en ángulo recto y dadas las limitaciones que impone la expresión de Keller (para $N < 1$), se ha utilizado la formulación de Kurze – Anderson.

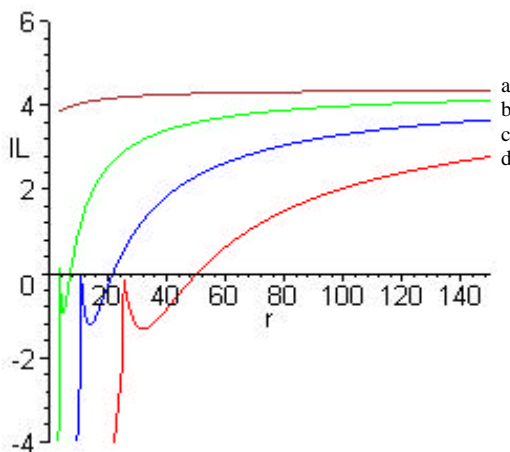


Figura 3. Diferencia entre IL de una pantalla plana y de una cuña en ángulo recto de altura equivalente.

Se observa, que las diferencias de pérdidas presentan un valor aproximadamente constante de 4 dB para esta geometría (curva a) y diferencias menores a medida que aumenta la altura de recepción, h_r , y disminuye la distancia r . En las curvas b,c y d existe un máximo local en $r = 3.6 \text{ m}$, $r = 10.8 \text{ m}$ y $r = 25.2 \text{ m}$ (abscisas correspondientes a los puntos de cruce del punto de recepción con la recta de iluminación directa, es decir, la que une la fuente con el vértice difractor), y un punto de corte con el eje de abscisas en $r = 6.8 \text{ m}$, $r = 21.5 \text{ m}$ y $r = 50 \text{ m}$ para el cuadrante en estudio., $p/2 < j < p$. Se debe recordar además que las pantallas presentan sus mejores características de protección para el cuadrante $0 < q < p/2$.

Para cada una de las gráficas, la parte de la curva situada a la izquierda del mencionado máximo local carece de significado, ya que corresponde a posiciones situadas en la zona de iluminación directa.

Es interesante destacar, que tanto las pantallas como las cuñas presentan valores asintóticos de IL cuando la distancia de recepción tiende a infinito.

Hasta este momento nos hemos referido a cuñas de ángulo recto (es decir ángulo exterior = $3p/2$): Para ángulos exteriores de cuña $p < b < 3p/2$ se obtienen valores asintóticos de IL que disminuyen a medida que el ángulo exterior de la cuña decrece (manteniendo fijas las demás condiciones geométricas del sistema). El valor máximo de la asíntota de IL corresponde al caso $b = 3p/2$.

Se obtienen análogas familias de curvas para otras situaciones geométricas, pudiendo concluir que, en general, las pantallas planas siempre presentan mayores pérdidas de inserción que los desniveles en talud (cuñas de ángulo recto).

Las ecuaciones (1) y (6) corresponden a casos ideales en los que no se contempla reflexiones en el terreno y se supone longitud infinita del obstáculo. Sin embargo la situación real es bien diferente, ya que al menos deben



tenerse en cuenta las reflexiones producidas por el emisor en el semiespacio anterior de la barrera, y por el receptor (imágenes) en el semiespacio posterior a la misma. Para estas situaciones se debe contemplar así mismo la naturaleza de tales superficies, o lo que es lo mismo, la impedancia acústica en las zonas en que se producen las reflexiones.

Bajo el punto de vista de la acústica de rayos, esta situación implica considerar al menos cuatro trayectorias que unen al receptor con el emisor pasando por el vértice difractor. Los cuatro potenciales de velocidad que contienen de forma implícita tanto los caminos recorridos, como los correspondientes coeficientes de difracción (función de los ángulos de incidencia y de difracción) deben sumarse cuadráticamente, y de su relación frente al potencial correspondiente al camino directo se obtienen las pérdidas por inserción.

Las presiones cuadráticas difractadas para cada situación (pantalla o cuña) tendrá la forma:

$$\langle p_d \rangle^2 = \left| \sum_{i=1}^4 A_0 10^{-IL_i/20} Q_i e^{-jk(D_i-d_0)} \right|^2$$

en donde A_0 corresponde a la amplitud de la onda emitida por la fuente acústica, IL_i las pérdidas por inserción de la pantalla o de la cuña correspondientes a cada una de las cuatro trayectorias D_i que unen la fuente o su imagen con el receptor y/o su imagen pasando por el vértice de difracción; d_0 es el camino directo entre emisor y receptor, y Q_i corresponde al coeficiente de reflexión de una onda esférica reflejada en el semiespacio emisor o receptor, para las ondas no reflejadas $Q_i = 1$.

Las pérdidas por inserción, tanto para la cuña como para la pantalla, pueden expresarse a través de la ecuación:

$$IL = -20 \log \left| \sum_{i=1}^4 A_0 10^{-IL_i/20} Q_i e^{-jk(D_i-d_0)} \right| \quad (7)$$

diferenciándose entre sí a través de la evaluación de las correspondientes pérdidas IL_i

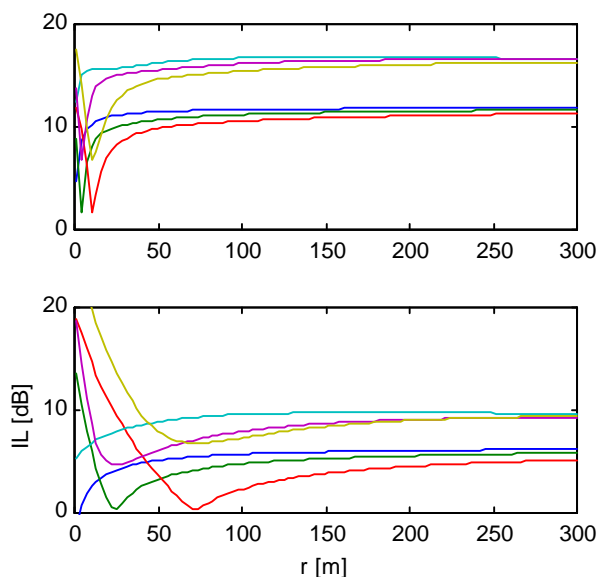


Figura 4. Pérdidas de inserción de pantallas (curvas superiores de las gráficas) y de cuñas (desniveles con ángulos rectos) de alturas equivalentes. En la figura superior la distancia de la fuente a la pantalla es de 3m; en la figura inferior de 20m. Cada haz de gráficas corresponde a alturas de recepción de $hr=3, 6$ y $12m$ respecto al nivel del emisor.

A título de ejemplo, en las figuras siguientes, se muestran unos casos próximos a la realidad, que pueden servir para clarificar las diferencias existentes entre ambos tipos de soluciones acústicas ante un problema de ruido de tráfico.

Se trata de una pantalla de 3m de altura, y de un talud de ángulo interior 90° con la misma altura. La fuente está situada a 0.5m del suelo y a dos distancias de la pantalla (talud): 3m (figura superior) y 20m (figura inferior). Para ambos conjuntos de gráficas, se ha supuesto que el receptor se sitúa a 3, 6, y 12 m. respecto al mismo plano del suelo que el emisor. Puede comprobarse que la pantalla presenta mejores características de protección frente al talud, también cuando se consideran reflexiones en el suelo (en este caso se supone asfalto en el semiespacio emisor $\sigma=3 \cdot 10^7$ Rayls MKS y hierba en el semiespacio receptor, $\sigma=3 \cdot 10^5$ Rayls MKS).

APENDICE



Con objeto de ilustrar gráficamente el diferente comportamiento de los algoritmos con las funciones integrales de Fresnel y las aproximadas por series, en la figura 5 se representa la ecuación (1) (curva a), y la (3) (curva b), expresadas en dB. para el caso: $H = 3$; $h_s=0.5$; $s=3$; $h_r= 6 m$, y $f = 630 Hz$. representativa de ruido de tráfico. Dichos valores dan una localización angular de la fuente en $J_0 @ 220^\circ$.

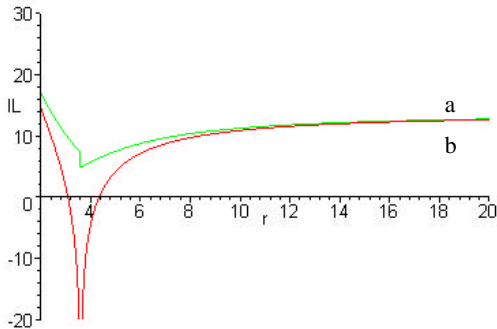


Fig 5. Pérdidas por inserción de una cuña de 3m. de altura, según el algoritmo de aproximación utilizado.

En las curvas a y b, se observa un mínimo local en $r = 3.6 m$ ($J @ 40^\circ$, situación del receptor en la recta de iluminación directa) y una diferencia de valores de $80.39 dB$ en $r = 3.6 m$

La parte de la curva situada a la izquierda del mínimo local no debe considerarse, ya que corresponde a posiciones del receptor situadas en la zona de iluminación directa y para valores de $r > 3.6 m$ la diferencia de los valores suministrados por la ecuación (1) y (3) va disminuyendo (y con ello el error absoluto), al igual que el ángulo J de recepción.

Utilizando la relación (5) y mediante cálculo numérico se encuentra un ángulo $J_{\text{límite}} = 5.67^\circ$ para esta geometría, concluyéndose que para dicho ángulo, el receptor está situado en el punto $(r, h_r) = (30.19 m, 6m)$ donde se obtiene un error absoluto de $0.09db$. Por tanto la Zona de Sombra es $0^\circ < J < 5.67^\circ$ y la Zona de Penumbra es $5.67^\circ < J < 40^\circ$, es decir, para

una situación real como es este caso, la Zona de Sombra es muy pequeña.

Si se evalúa la ecuación (1) y (3) en $r = 8 m$ (valor que parece aceptable observando la gráfica) se obtiene que el error absoluto es de $0.644 dB$. Es decir, con la condición de Pierce los resultados son muy precisos, pero su criterio es muy exigente.

Resultados parecidos se obtienen para $h_r = 12$ y $24 m$, obteniéndose unos $J_{\text{límite}} = 6.9^\circ$ y 7.4° respectivamente que corresponde a una distancia $r = 73.3 m$ y $r = 160.8 m$.

Incidencias rasantes (próximas a p), conducen a posiciones de recepción situadas en la zona de penumbra no existiendo $J_{\text{límite}}$. Obviamente, los mejores resultados se obtienen para situaciones de la fuente cercanas a 270° . ($s @ 1m$).

CONCLUSIONES

Para las diferentes situaciones estudiadas en este trabajo, tanto para cuñas y pantallas planas semi - infinitas, como en aquellos casos que consideran reflexiones en el terreno, se demuestra que las pantallas planas ofrecen siempre mayor protección acústica que las cuñas (o taludes) de alturas eficaces equivalentes.

Diferentes autores han opinado sobre este particular, pero en lo que a nosotros alcanza, no disponemos de datos que corroboren sus afirmaciones en pro o en contra de lo expuesto aquí. Así Kurze (5) afirma que para el caso ideal de pantallas y cuñas (sin considerar reflexiones) prevé una diferencia de 6 dB entre las correspondientes pérdidas de inserción; y Maekawa prevé un valor promedio de 5 dB menor en el caso de las cuñas. Por el contrario, Jonasson (4) mantiene la opinión (sin demostrarla) de que la capacidad de protección para las cuñas, a distancias largas del vértice difractor cuando se consideran difracciones en el terreno, es mayor que la de una pantalla de altura equivalente y menor a distancias cortas. En nuestra opinión sucede lo contrario, como se muestra en las figuras 3 y 4, en las que las IL proporcionadas por una cuña recta presenta ligeros incrementos de protección acústica frente a los proporcionados por una pantalla cuando la distancia de recepción es corta.

Como conclusión general, podemos afirmar que bajo el punto de vista acústico, situar las vías de comunicación en



taludes próximos a las zonas habitadas supone mas inconvenientes que ventajas frente a la solución clásica de protección por pantallas acústicas.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación AMB 98-1029 del Plan Nacional de I + D de la DGICYT:

BIBLIOGRAFÍA

- Oberhettinger, F. (1954): Diffraction of waves by a wedge. *Commun. Pure Appl. Math. Soc.* 7, 551-564.
- Li, Z.; Chang-ju, Z.: A diffraction field of traffic noise behind buildings along a street. *Internoise 87*.
3. Lim, B.D.; Lee, B.H. (1987): Efect of absorptive surfaces on the sound diffraction by a right angle wedge. *J.Acoust. Soc. Jpn. (E)* 8, 5.
4. Jonasson, H.G. (1972): Diffraction by wedges of finite acoustic impedance with applications to depressed roads., *Jour. Of Sound and Vib.*, 25, 4, 577-585.
5. Kurze, U.J. (1974): Noise reduction by barriers., *J. Acoust. Soc. Am.*, 55, 3, 504-518.
- Hadden, W.J.; Pierce, A.D. (1981): Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations. *J. Acoust. Soc. Am.* ,69, 5, 1266-1276.
- Pierce, A.D. (1974): Diffraction of sound around corners and over wide barriers. *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 5, 941-955.
8. Pierce, A.D. (1994): *Acoustics*, Acoustical Society of America, New York.
9. Rasmussen, K.B. (1985): On the effect of terrain profile on sound propagation outdoors. *Jour. Of Sound and Vib.* 98,1,35-44.

