

Diseño de Barreras Acústicas: Solución al Impacto del Ruido Generado por Carreteras

Jorge P. Arenas

Instituto de Acústica, Facultad de Cs. de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile, e-mail: jparenas@valdivia.uca.uach.cl.

Con el continuo desarrollo industrial y económico de las ciudades modernas, han comenzado a surgir graves problemas generados fundamentalmente por deficiencias en la planificación. Uno de los agentes contaminantes de los últimos tiempos es el ruido de tráfico, entendido como los sonidos perturbadores producidos por las fuentes móviles y estacionarias, asociadas a vehículos de todo tipo. Una fuente importante la constituyen las vías de circulación rápida, las cuales conectan los diferentes sectores de la ciudad, y también, la ciudad con otros centros urbanos. Esto ha generado una serie de estudios, tendientes a minimizar los efectos del ruido en las zonas residenciales. Una alternativa de solución muy empleada por las administraciones de Estados Unidos, Japón y Europa, han sido las barreras acústicas[17,42], dispuestas en torno a las carreteras de gran tráfico, las cuales permiten la reducción de los niveles de ruido. Sin embargo, al momento de diseñar estas barreras, se deben considerar principios físicos bastante complicados, para finalmente decidir cual alternativa será la correcta[32].

Las predicciones de las atenuaciones introducidas por las barreras, requerirán de fórmulas para diseño que sean fáciles de manejar, y que permitan hacer cálculos rápidos. Es bien sabido que los efectos de atenuación por barreras se deben a los fenómenos de difracción asociados, por lo cual se necesita estudiar el problema físico, y en base a las aproximaciones de las complicadas fórmulas de las teorías de difracción, poder entregar algoritmos de predicción[28,29,44].

La teoría de la difracción tiene su origen en el principio de Huygens-Fresnel, el cual es la base para la aproximación de Kirchhoff y otras teorías que dan cuenta de la difracción producida dentro y fuera de la zona de sombra [6,15,38]. Se puede señalar que el fenómeno de la difracción, producida por una cuña semi infinita y de borde recto, fue estudiada con detalle por Sommerfeld a fines del siglo pasado[74,45]. El suponía una incidencia de ondas planas y realizaba los cálculos en base a la teoría de potenciales para resolver el problema de valor de contorno. Sin embargo, aparentemente, el primero en derivar una solución para incidencia de ondas esféricas fue Macdonald en 1915[46]. Posteriormente, el tema ha interesado a numerosos físicos, ingenieros y matemáticos, los

cuales han tratado de derivar resultados analíticos, trabajando, por lo general, en base a los desarrollos asintóticos de las soluciones (Lamb, Carslaw, Bromwich, Oberhettinger[61,62], etc.).

Pasaron muchos años antes de aplicar las teorías a las barreras acústicas. Redfearn en 1940[71], desarrolló un ábaco para calcular la atenuación producida por una barrera acústica, por medio de dos parámetros. Estos eran el ángulo de difracción y la altura efectiva de la barrera dividida por la longitud de onda del sonido considerado. Debido a que la solución rigurosa de Macdonald depende de más de dos parámetros, es claro que los errores involucrados en el ábaco de Redfearn pueden ser muy grandes. Fehr, en 1951[19], presenta una curva práctica de aislación en función del número de Fresnel. Este trabajo supone que tanto el emisor como el receptor se encuentran al nivel del suelo y que la distancia entre el receptor y la barrera era lo suficientemente grande, comparada con la altura de la barrera. Los resultados indicaban un límite práctico de aislación del orden de 20 dB y este trabajo fue adoptado como norma británica para el diseño.

En 1957 comenzaron a publicarse los trabajos de Keller[36,37], los cuales introducen el concepto de la teoría geométrica de la difracción, la cual permite tratar complejos problemas difractivos, derivando soluciones aproximadas relativamente simples, las cuales combinan la practicabilidad de las aproximaciones de Kirchhoff con la precisión de las soluciones de Sommerfeld y Macdonald. Keller aplicó esta metodología al problema de difracción por cilindros convexos y por diferentes geometrías de aperturas[35]. El año 1961, Keller y Magiros[34] presentan un trabajo sobre la difracción de una pantalla semi infinita con un borde cilíndrico, en el cual obtienen una expresión final por medio de las expansiones de las funciones propias radiales y tangenciales, para finalmente estudiar las convergencias de las series resultantes. En 1968, Maekawa[47] publica en inglés un trabajo muy importante en el desarrollo de la teoría de barreras. El propone un ábaco de cálculo, basado en numerosos experimentos conducidos en 1965, sobre una barrera de concreto de 2 m de altura y de 0.17 m de espesor. No está muy claro el origen y los detalles de los experimentos, sin embargo, su ábaco es ampliamente conocido[48]. En un tutorial review de Kurze, en 1974,[40] se critican los resultados en base a consideraciones de tipo atmosférico (Ingard y Maling, 1963[27]), de absorción del terreno y los efectos de directividad de la fuente, lo cual explicaría algunos resultados experimentales que no están de acuerdo con los teóricos. En su trabajo, Maekawa propone además, una metodología para ser usada en el caso de barreras finitas y con reflexiones en el piso, aplicando la integral de Kirchhoff-Fresnel. Un trabajo más moderno acerca del efecto de las turbulencias atmosféricas en la aislación de una barrera, es el de Daigle de 1982[11].

En 1969, Rathé[69] propone una tabla de datos de atenuación en función del número de Fresnel como un esquema ingenieril para diseño. La comparación de este trabajo con la teoría geométrica de la difracción, permite que Kurze y Anderson, en 1971,[41] propongan una expresión analítica simple para el cálculo de atenuación para el caso de una fuente puntual. Este análisis tomaba en cuenta incidencia oblicua y también la región de transición entre la zona iluminada y la de sombra. Además, demuestran que la transmisión de sonido a través de la barrera es despreciable para masas superficiales que exceden los 20 Kg./m², considerando las características típicas del ruido de tráfico.

En 1972, Ambaud y Bergassoli[1] presentan una complicada solución para el problema de difracción por una cuña, obteniendo resultados numéricos por medio de un computador UNIVAC 1108, los cuales fueron comparados con cuidadosos experimentos sobre modelos a escala. Los resultados son bastante buenos, siendo las desviaciones en los resultados del orden de la incerteza en las mediciones. Desafortunadamente, la expresión analítica requiere de un gran tiempo de cálculo. Estos estudios fueron continuados por Daumas, en 1978[12]. En 1972, Jonasson[32,33] publicó dos trabajos referente a la reducción del ruido por barreras sobre la tierra, considerando los coeficientes de reflexión del piso aplicando los resultados de Delany y Bazley[14, 4]. En este trabajo, se obtienen dos desarrollos asintóticos de la teoría de Macdonald, las cuales permiten estudiar los casos límites de la distancia barrera-receptor. Estos resultados son aplicados a experimentos desarrollados en una barrera de 3 m de altura, encontrando buena correlación con la teoría. Además, se demostró que si la barrera es absorbente, no existe importancia práctica al compararla con una reflectante. Un trabajo interesante para entender los desarrollos asintóticos mencionados por Jonasson, es presentado por Barbone en 1994[5].

Tatge, en 1973,[75] estudia la atenuación de una barrera usando una fuente lineal finita, compuesta de pequeñas fuentes incoherentes, separadas a igual distancia. También, en este trabajo, se mencionan algunas fórmulas de aproximación para el ábaco de Maekawa. Los resultados de Tadge mostraban que si la fuente y la barrera eran paralelas, la atenuación en alta frecuencia disminuye en 3 dB cuando la distancia fuente-barrera es duplicada, y varía como $10\log(1-h/H)$, donde h es la altura de la fuente y H es la altura de la barrera.

En 1974, Pierce[67] publica un trabajo sobre la difracción de sonido en torno a esquinas y barreras de espesor considerable. Esta venía a ser una nueva teoría, que permitía expresar los resultados en términos de las funciones auxiliares de Fresnel. En este trabajo, se demuestra que algunas de las aproximaciones sugeridas por Maekawa para el cálculo de barreras de espesor considerable, podían no ser aplicables en algunos casos. Para esto, se sugiere un método alternativo, basado en la teoría de difracción por cuñas, desarrollada por Pierce, la cual parece ser una de las más rigurosas y exactas. Rawlins, en 1976,[70] obtiene una solución para el problema de la difracción por ondas planas por un plano semi infinito, el cual tiene una región absorbente en la vecindad del borde. El concluye que el material absorbente dispuesto cerca del borde, necesitaba ser del orden de una longitud de onda de largo, para tener el mismo efecto aproximado que una barrera perfectamente absorbente. Este trabajo es sólo teórico y no se reportan resultados experimentales. La consideración de planos de impedancia finita e infinita, ha sido tratada detalladamente por Thomasson, en 1976 y 1977,[76,77] estudiando las soluciones para fuentes puntuales en presencia de contornos de impedancia límites, obteniendo resultados integrables numéricamente.

En 1980, Embleton[16] obtiene una teoría de difracción basada en una integral de línea a lo largo del borde libre de una barrera semi infinita, basándose en la fórmula de Young-Rubinowicz. Se plantean expresiones que no tienen solución analítica, pero sin

embargo, son muy apropiadas para resolver numéricamente, con la ayuda de un computador. Isei *et al.*, en 1980,[30] muestran resultados experimentales comparados con la teoría de Embleton y con otras, para las atenuaciones producidas por una barrera, considerando una fuente puntual y terreno con impedancias finitas. Sus resultados muestran diferencias de hasta 10 dB al aplicar algunas de las teorías conocidas, para ciertas condiciones geométricas. Por otra parte, Medwin, en 1981,[55] y Medwin *et al.*, en 1982,[56] obtienen expresiones para la sombra producida por barreras finitas, realizando una extensión de la teoría de Biot-Tolstoy para fuentes impulsivas. Ellos trabajaron con modelos a escala, usando técnicas de pulso y digitalizando las señales medidas. Con estas herramientas, les fue posible obtener resultados en función de la frecuencia, aplicando la transformada de Fourier discreta en casos de cuñas, barreras de espesor grande y de placas de dimensiones pequeñas. Los resultados demostraban ser bastante cercanos (del orden de 0.5 dB) con los datos teóricos. En 1983, Nicolas *et al.*[60], presentan resultados experimentales en modelo a escala, usando como fuente puntual un pequeño altavoz y generando pulsos. Se comparan las teorías de Macdonald (aproximada a primer orden), Embleton y Maekawa, mostrando grandes diferencias comparativas, cuando se realizan mediciones en terreno reflectante, por lo cual se sugieren algunas correcciones empíricas. Otra teoría interesante para estudiar la propagación en planos de impedancia, se encuentra en el trabajo de Chien y Soroka de 1975[10].

En 1987, Zhonglin y Yuguang[79], muestran resultados de la atenuación introducida por una barrera, aplicada en un ambiente industrial. Ellos realizan los cálculos teóricos aplicando la teoría de Kirchhoff-Fresnel. Los resultados obtenidos son relativamente aceptables en el rango de frecuencias medias y bajas, sin embargo, no se entregan datos acerca de las condiciones acústicas del recinto industrial. Los efectos de la refracción en el campo difractado por una barrera cilíndrica son estudiados por Cole en 1987[8], aplicando los resultados de la teoría geométrica de Keller y examinando las soluciones exactas y asintóticas.

Al parecer, la investigación que sigue, es cómo mejorar la atenuación de las barreras ya existentes (Butler, 1974[7]). Una forma es modificar las características de los bordes en las barreras (cubreras), para mejorar la atenuación de las mismas. Esto fue realizado por Fujiwara y Furuta en 1991[20], quienes patentaron una barrera, con un cilindro absorbente como cubrera, desarrollado aplicando la teoría de Keller. Los resultados se compararon en una barrera ya existente y se encontró un aumento de la atenuación del orden de 2 a 3 dB(A) en el caso con cubrera cilíndrica. En un trabajo de May y Osman (1980)[53] se presentan resultados de barreras con cubreras de varias formas y con tratamientos absorbentes, desarrolladas en modelos a escala 1:16. Las cubreras con forma de T, de anchos mayores a 60 cm, mostraron ser muy eficientes en la reducción de ruido. Se comprobaron estos resultados en un trabajo experimental sobre una barrera real en Toronto (May y Osman, 1980[52]). La barrera tenía 4 metros de altura y con la cubrera en forma de T se aumentó la pérdida de inserción entre 1 y 1.5 dB(A). Además, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las reducciones del ruido al utilizar configuraciones absorbentes y reflectantes.

Por otra parte, varias formas de cubreras han sido examinadas numéricamente en la Universidad de Bradford, por Hothersall *et al.* (1991)[24], aplicando el método de elementos de contorno (BEM)[73] a un modelo bidimensional, sometido a ruido de tráfico. El mismo Hothersall muestra en 1994[25] que el BEM puede ser muy eficiente en formas irregulares. En este trabajo se compara el método numérico con datos experimentales obtenidos sobre modelos a escala 1:20 y mediciones en terreno mostrando una buena correlación de resultados. Se consideraron seis posiciones fijas de receptor entre 20 y 100 metros de distancia a la barrera. Además, se probaron perfiles de varias formas geométricas y terminaciones absorbentes. Sin embargo, no se encontraron buenos resultados al comparar las barreras absorbentes con los modelos a escala y mediciones en terreno. Otros resultados se pueden encontrar en el trabajo de Hothersall y Harriot de 1995[26]. En 1991, Makarewicz y Jarzecki[50], presentan un modelo para calcular la atenuación de las barreras al ruido de tráfico. Ya que este estudio está orientado a la reducción del ruido producido por tráfico rodado, es conveniente señalar que el ruido producido por los vehículos se compone del ruido del motor y carrocería y del ruido producido por el roce de los neumáticos con los diferentes tipos de pavimento. A velocidades mayores a los 50 Km/hora, prácticamente todo el ruido es producido por el roce de neumáticos en los diferentes tipos de suelos. Esto ha sido adoptado como norma por diferentes administraciones y avalado por numerosos estudios[51,50,53]. El tercio de octava más representativo de este tipo de ruido, varía entre los 500 a 700 Hz, ponderado según la curva A. De esta manera se considera que el espectro representativo del ruido de tráfico se encuentra comprendido entre los rangos anteriores en bandas de tercios de octava[39]. En su trabajo, Makarewicz y Jarzecki consideran fuentes móviles, por lo cual expresan los resultados en función del tiempo, los cuales son integrados de acuerdo a las definiciones de nivel de exposición sonora en dB(A). En todo caso, Makarewicz en 1992,[49] presenta el modelo ampliado a la atenuación combinada por barreras y obstáculos mayores, como edificios, pero empleando las ecuaciones propuestas por Kurze y Anderson.

En 1992, Yamamoto y Takagi,[78] presentan expresiones matemáticas para calcular las pérdidas por barreras usando la carta de Maekawa. Ellos realizan aproximaciones de los datos experimentales mediante funciones conocidas, entregando 4 expresiones numéricas para diseño. Estas contienen numerosas constantes, pero son útiles al momento de programar en un computador. Las desviaciones máximas encontradas entre sus aproximaciones y los datos leídos de la carta de Maekawa, alcanzan los 0.5 dB en el rango de números de Fresnel entre -0.3 y 1.0. De los resultados se aprecia una buena correlación con los datos entregados en un trabajo anterior de Delany (1972)[13], quien utilizó un polinomio de aproximación.

El interés por estudiar la factibilidad de caracterizar las barreras mediante un número único o baremo global, es mencionado por Pfrezschner y Simón, en 1993,[64] mencionando que la consecución de un índice descriptor de la calidad o capacidad de protección de una barrera, así como el procedimiento adecuado para su determinación, producirá numerosos beneficios sobre la base de un lenguaje común de referencia para las Administraciones, ingenierías y consumidores. Ellos trabajan en esencia con el algoritmo de

Kurze y Anderson, obteniendo un índice en dB(A), correspondiente al valor asintótico de la pérdida de inserción. Además, se mencionan aspectos metrológicos, relacionados con el espectro de ruido de tráfico ponderado en A (según norma ISO 717.2) y la altura óptima para posicionar el micrófono de recepción. Más detalles se encuentran en un trabajo posterior de Pffretzschner *et al.* de 1995[65,66]. En 1994, Lam[43] presenta un artículo relativo al cálculo de pérdida de inserción para terrenos con diferentes coeficientes de reflexión, introduciendo explícitamente estos datos en las ecuaciones de difracción. Se muestran resultados comparativos entre las teorías de Pierce, Maekawa y ecuaciones integrales. También, se discuten los modelos utilizados por distintas Administraciones para el cálculo de ruido ambiental.

Fahy *et al.* en 1995,[18] desarrollan una forma modular de barrera de cara absorbente, para uso en ruido de tráfico. Esta fue diseñada en base a absortores acoplados, permitiendo incorporarla a barreras ya construidas. Se destaca el bajo costo y la resistencia a factores climáticos y ambientales adversos. Estudios muy recientes indican que se podría mejorar la efectividad de las barreras, desarrollando perfiles randómicos de diferentes alturas y espaciamientos, dependientes de la longitud de onda considerada. Todo el borde recto de una barrera, puede ser comparable a una línea recta de fuentes altamente correlacionadas. De esta forma, al producir bordes randómicos, se provoca una superposición de fuentes no correlacionadas en el punto de interés, con lo cual se predicen aumentos de aislación del orden de los 3 a 8 dB. Este tema está siendo estudiado por Ho, Busch-Vishniac y Blackstock(1995)[22,23] en la Universidad de Texas. Otra forma es utilizar múltiples bordes de difracción, pero no se establece el costo económico de esta medida (Crombie *et al.*)[9]. Por otro lado, en 1995, Möser[59] presenta un modelo de cumbrera cilíndrica de impedancia mejorada. En una conferencia[58] se muestran los resultados de simulaciones computacionales de las soluciones, considerando impedancias en casos límites y diagramas vectoriales del campo acústico difractado. Finalmente, Arenas y Monsalve (1996)[3], presentaron resultados sobre modelos a escala con diferentes diseños de bordes, entregando valores comparativos con los resultados de un trabajo anterior[2]. Se aprecia que varios diseños de cumbreras permiten mejorar notablemente el aislamiento al ruido y se hace muy interesante el desarrollo de modelos a escala, ya que el trabajo experimental con barreras reales es limitado por los costos[2].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ambaud, P., Bergassoli, A. (1972): Le problème du dièdre en acoustique, *Acustica* 27, 291-298.
- [2] Arenas, J.P. (1996): Estudio sobre la difracción y atenuación introducida por barreras acústicas. Tesis MSc Física, Escuela de Graduados, Universidad Austral de Chile.
- [3] Arenas, J.P., Monsalve, A.M. (1996): Scale-model experiments on diffraction produced by different noise barrier edge designs, Proc. 4th Int. Congress on Sound and Vibration, St. Petersburg, Junio 24-27. 1127-1134.
- [4] Attenborough, K., Hayek, SI., Lawther, JM. (1980): Propagation of sound above a porous half-space, *J. Acoust. Soc. Am.* 68, 1493-1501.

- [5] Barbone, PE. (1994): Approximate diffraction coefficients by the method of Matched asymptotic expansions, Technical Report AM-94-008, Univ. of Boston.
- [6] Born, M., Wolf, E. (1970): Principles of Optics, Pergamon, New York.
- [7] Butler, GF. (1974): A note on improving the attenuation given by a noise barrier, *J. Sound Vib.* 32, 367-369.
- [8] Cole III, JE. (1987): Diffraction of sound by a refracting cylindrical barrier, *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 222-225.
- [9] Crombie, DH., Hothersall, DC., Chandler-Wilde, SN. (1995): Multiple-edge noise barriers, *Appl. Acoust.* 44, 353-367.
- [10] Chien, CF., Soroka, WW. (1975): Sound propagation along an impedance plane, *J. Sound Vib.* 43, 9-20.
- [11] Daigle, GA. (1982): Diffraction of sound by a noise barrier in the presence of atmospheric turbulence, *J. Acoust. Soc. Am.* 71, 847-854.
- [12] Daumas, A. (1978): Etudes de la diffraction par un écran mince disposé sur le sol, *Acustica* 40, 212-222.
- [13] Delany, ME. (1972): A practical scheme for predicting noise levels (L10) arising from road traffic, NPL Acoustics Report AC57.
- [14] Delany, ME., Bazley, EN. (1970): Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoust.* 3, 105-116.
- [15] Elmore, WC, Heald, MA. (1985): Physics of Waves, Dover, New York.
- [16] Embleton, TFW. (1980): Line integral theory of barrier attenuation, *J. Acoust. Soc. Am.* 67, 42-45.
- [17] Embleton, TFW., Piercy, JE., Olson, N. (1976): Outdoor sound propagation over ground of finite impedance, *J. Acoust. Soc. Am.* 59, 267-277.
- [18] Fahy, FJ., Ramble, DG., Walker, JG., Sugiura, M. (1995): Developement of a novel modular form of sound absorbent facing for traffic noise barriers, *Appl. Acoust.* 44, 39-51.
- [19] Fehr, RO. (1951): The reduction of industrial machine noise, Proc. 2nd Ann. Nat. Noise abatement symposium, Chicago, 93-103.
- [20] Fujiwara, K., Furuta, N. (1991): Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge, *Noise Control Eng.* 37, 5-11.
- [21] Gautschi, W. (1965): Error function and Fresnel integrals, in Handbook of Mathematical Functions, Editores Abramowitz, M. y Stegun, IA., Dover, New York., 295-329.
- [22] Ho, S., Busch-Vishniac, IJ., Balckstock, DT. (1995): Noise barriers with random edge profiles, *J. Acoust. Soc. Am.* 97, Pt. 2, 3392 (en abstract).
- [23] Ho, S., Busch-Vishniac, IJ., Balckstock, DT. (1995): Model experiment on noise barriers having a random edge, *J. Acoust. Soc. Am.* 98, Pt. 2, 2958 (en abstract).
- [24] Hothersall, DC., Chandler-Wilde, SN., Hajmirzae, MN. (1991): Efficiency of single noise barriers, *J. Sound Vib.* 146, 303-322.
- [25] Hothersall, DC. (1994): The mathematical modelling of the performance of noise barriers, *Journal of Building Acoustics*, 1, No 2, 91-104.
- [26] Hothersall, DC., Harriott, JNB. (1995): Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 918-926.

- [27]Ingard, U., Maling, GC. (1963): On the effect of atmospheric turbulence on sound propagation over ground, *J. Acoust. Soc. Am.* 35, 1056-1058.
- [28]Isei, T., Embleton, TFW., Piercy, JE. (1978): Comparison of theoretical and measured sound levels behind barriers with ground, *J. Acoust. Soc. Am.*, Suppl. 1 64, S172.
- [29]Isei, T., Embleton, TFW., Piercy, JE. (1978): Influence of reflections at the ground on insertion loss of barriers, *J. Acoust. Soc. Am.*, Suppl. 1 63, S59.
- [30]Isei, T., Embleton, TFW., Piercy, JE. (1980): Noise reduction by barriers on finite impedance ground, *J. Acoust. Soc. Am.* 67, 46-58.
- [31]Jahnke, E., Emde, F. (1945): Tables of Functions, Dover Publications, New York.
- [32]Jonasson, HG. (1972): Diffraction by wedges of finite acoustic impedance with application to depressed roads, *J. Sound Vib.* 25, 577-585.
- [33]Jonasson, HG. (1972): Sound reduction by barriers on the ground, *J. Sound Vib.* 22, 113-126.
- [34]Keller, JB, Magiros, DG. (1961): Diffraction by a semi-infinite screen with a round end, *Comm. Pure and Applied Math.* 14, 457-471.
- [35]Keller, JB. (1956): Diffraction by a convex cylinder, *IRE Trans. Antennas and Prop.*, AP-4, 312-321.
- [36]Keller, JB. (1957): Diffraction by an aperture, *J. Appl. Phys.* 28, 426-444.
- [37]Keller, JB. (1962): The geometrical theory of diffraction, *J. Opt. Soc. Am.* 52, 116-130.
- [38]Klein, MV. (1970): Optics, John Wiley & Sons, New York.
- [39]Kurze, UJ. (1971): Noise from complex road traffic, *J. Sound Vib.* 19, 167-177.
- [40]Kurze, UJ. (1974): Noise reduction by barriers, *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 504-518.
- [41]Kurze, UJ., Anderson, GS. (1971): Sound attenuation by barriers, *Appl. Acoust.* 4, 35-53.
- [42]Kurze, UJ., Beranek, LL. (1971): Sound propagation outdoors, in Noise and Vibration Control, Editor LL. Beranek, McGraw-Hill, New York.
- [43]Lam, YW. (1994): On the modelling of the effect of ground terrain profile in environmental noise calculations, *Appl. Acoust.* 42, 99-123.
- [44]Lam, YW., Roberts, SC. (1993): A simple method for accurate prediction of finite barrier insertion loss, *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1445-1452.
- [45]Landau, L.D., Lifschitz, E.M. (1975): Electrodinámica de los medios continuos, Vol. 8, Serie Física Teórica, Reverté, Barcelona.
- [46]MacDonald, HM. (1915): A class of diffraction problems, *Proc. Lond. Math. Soc.* 14, 410-427.
- [47]Maekawa, Z. (1968): Noise reduction by screens, *Appl. Acoust.* 1, 157-173.
- [48]Maekawa, Z. (1977): Shielding highway noise, *Noise Control Eng.* 9, 38-44.
- [49]Makarewicz, R. (1992): Barrier attenuation in terms of A-weighted sound exposure level, *J. Acoust. Soc. Am.* 91, 1500-1503.
- [50]Makarewicz, R., Jarzecki, J. (1991): Barrier attenuation of traffic noise, *Appl. Acoust.* 32, 3-11.
- [51]Martín, MA. (1994): Estudio sobre modelo de las características y pérdidas por inserción de barreras anti-ruido, Tesis Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Madrid.

- [52] May, DN., Osman, MM. (1980): The performance of sound absorptive, reflective and T-profile noise barriers in Toronto, *J. Sound Vib.*, 71(1), 65-71.
- [53] May, DN., Osman, MM. (1980): Highway noise barriers: new shapes, *J. Sound Vib.*, 71(1), 73-101.
- [54] McLachlan, NW. (1961): Bessel Functions for Engineers, Clarendon Press, Oxford.
- [55] Medwin, H. (1981): Shadowing by finite barriers, *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1060-1064.
- [56] Medwin, H., Childs, E., Jepsen, GM. (1982): Impulse studies of double diffraction: a discrete Huygens interpretation, *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1005-1013.
- [57] Morse, P., Ingard, KU. (1968): Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New York.
- [58] Möser, M. (1995): On sound barriers with headpieces equipped with acoustical impedances, Proc. 2do encuentro Int. de Acústica, Valdivia, 55-66.
- [59] Möser, M. (1995): Die wirkung von zylindrischen aufsätzen an schallschirmen, *Acustica* 81, 565-586.
- [60] Nicolas, J., Embleton, TFW., Piercy, JE. (1983): Precise model measurements versus theoretical prediction of barrier insertion loss in presence of the ground, *J. Acoust. Soc. Am.* 73, 44-54.
- [61] Oberhettinger, F. (1954): Diffraction of waves by a wedge, *Comm. Appl. Math.* 7, 551-564.
- [62] Oberhettinger, F. (1956): On asymptotic series for functions occurring in the theory of diffraction of waves by wedges, *J. Math. Phys.* 34, 245-255.
- [63] Pauli, W. (1938): On asymptotic series for functions in the theory of diffraction of light, *Phys. Rev.* 54, 924-931.
- [64] Pffretzschnner, J., Simón, F. (1993): Caracterización de barreras acústicas mediante la aplicación de un baremo global, *Tecnicacústica* 93, 35-38.
- [65] Pffretzschnner, J., Simón, F., de la Colina, C., Moreno, A. (1995): Rating the insertion loss of noise barriers by a single number, Proc. Int. Cong. on Acoust., Trondheim, 247-250.
- [66] Pffretzschnner, J., Simón, F., Arenas, JP., Monsalve, AM. (1995): Modelo a escala reducida para el estudio de la idoneidad de algoritmos de predicción de las pérdidas por inserción producidas por pantallas acústicas, Proc. 2do Encuentro Int. de Acústica, Valdivia, 162-165.
- [67] Pierce, AD. (1974): Diffraction of sound around corners and over wide barriers, *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 941-955.
- [68] Pierce, AD. (1989): Acoustics, An Introduction to its Physical Principles and Applications, Acoustical Soc. Am. through Am. Inst. Physics, New York.
- [69] Rathé, EJ. (1969): Note on two common problems of sound propagation, *J. Sound Vib.* 10, 472-479.
- [70] Rawlins, AD. (1976): Diffraction of sound by a rigid screen with a soft or perfectly absorbing edge, *J. Sound Vib.* 45, 53-67.
- [71] Redfearn, SW. (1940): Some acoustical source-observer problems, *Phil. Mag. J. Sci.* 30, 223-236.
- [72] Rubinowicz, A. (1965): Progress in Optics, John Wiley & Sons, New York.
- [73] Sez nec, R. (1980): Diffraction of sound around barriers: use of boundary element technique, *J. Sound Vib.* 73, 195-209.

- [74] Sommerfeld, A. (1897): Mathematical theory of diffraction, *Proc. Lond. Math. Soc.* 27, 395-429.
- [75] Tatge, RB. (1973): Barrier-wall attenuation with a finite-sized source, *J. Acoust. Soc. Am.* 53, 1317-1319.
- [76] Thomasson, SI. (1976): Reflections of waves from a point source by an impedance boundary, *J. Acoust. Soc. Am.* 59, 780-785.
- [77] Thomasson, SI. (1977): Sound propagation above a layer with a large reflection index, *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 659-674.
- [78] Yamamoto, K., Takagi, K. (1992): Expressions of Maekawa's chart for computation, *Appl. Acoust.* 37, 75-82.
- [79] Zhonglin, P., Yuguang, Z. (1987): Insertion loss of sound insulation barrier, *Proc. Internoise 87*, 383-386.