

DIFRACCIÓN ACÚSTICA POR FACHADAS ESCALONADAS Y SU APLICACIÓN A LA ARQUITECTURA MODERNISTA: UNA APROXIMACIÓN DE SU PROTECCIÓN ACÚSTICA

REFERENCIA PACS: 43.20.Gp, 43.50.Gf

F. Simón, R.M^a Rodríguez, J. Pfretzschner
Instituto de Acústica CSIC
Serrano 144
28006 Madrid

ABSTRACT

Buildings with stepped profiles, not only present esthetical aspects including an increase of luminosity in narrow streets, but also may show better acoustical performances. These profiles may diminish the cannon effect and the noise pressure levels on the building facade, which in turn, may reduce intruding noise levels, inside such buildings.

The diffracted field due to every building dihedral is calculated starting from Pierce expressions, where Fresnel integrals has been substituted by Hutchings polynomials, obtaining a better approximation than Pierce's. Besides, these polynomials are valid for all the argument values, avoiding the restrictions of the approximation suggested by Pierce.

This works shows both qualitatively as quantitatively some acoustical advantages of this kind of buildings comparing them with prismatic ones

INTRODUCCIÓN

En las zonas urbanas, la presencia de edificios puede marcar la forma de propagación de la onda acústica a través del medio. Su presencia determina las propiedades del campo acústico en varios sentidos: por un lado perjudica la calidad sonora del entorno ya que favorece la compartimentación de la ciudad en zonas a través de las cuales la perturbación sonora se propaga con ciertas preferencias, surgiendo fenómenos como el efecto cañón, el aumento de nivel de presión acústica por reverberación, deterioro de las condiciones de propagación en campo libre (y, como consecuencia, la desviaciones de la atenuación de la señal con la distancia), presencia de ecos, etc. Por otro, estos mismos edificios ejercen de fronteras a la propagación, impidiendo que el campo acústico se propague de unas zonas a otras. Sin embargo, estas fronteras no son estancas y por tanto su protección no es total.

Desde el punto de vista de la teoría geométrica de la propagación acústica, existen dos trayectorias principales a través de las cuales el sonido puede bordear el edificio, bien por su parte superior, o bien por los laterales. La primera suele implicar grandes diferencias de caminos que dan como resultados protecciones muy altas, por lo que normalmente, en lo estudios de previsión de ruido se desprecia. La segunda sin embargo presenta una variabilidad tan grande en las diferencias de caminos, que debería ser tenida en cuenta, ya que estos bordes laterales (las esquinas de los edificios) pueden presentar, para ciertas configuraciones, diferencias de caminos lo suficientemente pequeñas como para que la pérdida de energía acústica debida a la difracción por las esquinas no sea despreciable.



En cualquier caso todo el razonamiento desarrollado hasta aquí tiene que ver con el impacto acústico que supone el edificio para la ciudad y su entorno, pero pocos estudios se han realizado en los que se considere el impacto que desde el punto de vista acústico tiene el edificio para sus habitantes, y ese es el objetivo del presente trabajo. Se verá como la naturaleza acústica de sus fachadas afecta al bienestar de sus habitantes y como sus formas pueden beneficiar a los mismos proveyéndoles de un mayor confort acústico.

A principios de siglo nos encontramos con una gran profusión de ejemplos, ya que en los años 20 se construyen infinidad de rascacielos con fachadas retranqueadas, y mas claros exponentes pueden encontrarse en las edificaciones escalonadas de la exposición de París de 1925 como la *Porte d' Honneur* de Henri Favier y André Ventre y los pabellones de *La Maitresse* (Galerías Lafayette), *Pomone* (Au Bon Marché), *Studium* (del Louvre) y *Primavera* (de Printemps) caracterizados por sus retranqueados arquitectónicos en zig-zag. Esta exposición tuvo una gran influencia entre los arquitectos de Estados Unidos y así la exposición de Chicago en 1933 reunió una pléyade de arquitectos que incorporaron una gran variedad de motivos del estilo Art Decó, entre los que se encontraban los retranqueados estilo rascacielos, volúmenes y formas cilíndricas influidas por el cubismo además de otros elementos de adorno con estilizadas figuras, dibujos geométricos, utilización innovadora del vidrio y otros materiales de la era modernista, todo lo cual producía brillantes efectos cromáticos...y a nuestro juicio, además unas excelentes condiciones de protección acústica debida a unas entonces no controlados efectos de difracción por esquinas.

TEORÍA

Cuando en una zona urbana se produce un ruido, éste se propaga libremente hasta las fachadas de los edificios, reflejándose en ellas y penetrando a través de ventanas y puertas de las terrazas, fundamentalmente, dando lugar al ruido de inmisión, tan característico de la ciudad. En estas condiciones de partida, la única forma de disminuir estos niveles de inmisión consiste en la reducción del nivel de potencia sonora de la fuente causante del ruido, o mediante la instalación de elementos absorbentes en las superficies reflectoras como pueden ser las fachadas o los distintos elementos que conforman el mobiliario urbano; esta última solución no disminuiría la contribución a la energía del rayo directo pero sí la del campo reflejado que, como se ha descrito en la introducción, puede ser importante. A la hora de considerar la posibilidad de disminuir el nivel de inmisión se podría plantear el utilizar el edificio para crear pequeñas barreras acústicas que impidieran la propagación del ruido hasta las puertas, ventanas y demás vías de penetración. Para la construcción de dichas barreras sería necesario retranquear cada uno de los pisos del edificio que componen la fachada de forma que se creara en todos ellos una terraza que a la vez de proporcionar mejores condiciones de iluminación de la calzada permitiera la construcción de una baranda ciega que funcionara como pantalla acústica, y/o en su caso aprovechar las condiciones de difracción aportadas por el diedro (esquina del edificio). Esta disposición de los pisos da lugar a edificios piramidales, ya utilizados en arquitectura desde 1920 y tiene como ventaja adicional el que, al ir abriéndose con la altura, el ambiente se vuelve menos "reverberante" mejorando la calidad acústica del entorno y reduciendo los niveles de presión sonora debidos al efecto túnel de la calle.

El estudio tanto cualitativo como cuantitativo de los procesos de difracción en los bordes y esquinas de los edificios a proyectar o existentes a ambos lados de una calle, puede realizarse mediante técnicas numéricas de elementos de frontera (que implica largos consumos de tiempo de cálculo), o bien utilizar algoritmos basados en la teoría geométrica de la difracción, como los propuestos por Pierce [1, 2, 3] para la difracción por esquinas rígidas, cuyos cortos tiempos de cálculo los hacen mas idóneos para la confección de mapas como los que se presentan en este trabajo.

Pierce establece un modelo que partiendo de una particularización 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.



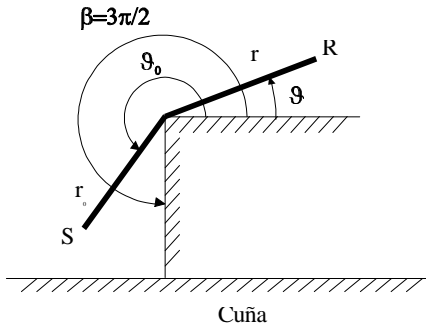


Figura 1

(índice de cuña) con β ángulo exterior de la cuña; k número de onda.

Si restringimos el problema a dos dimensiones (plano perpendicular al vértice de la cuña, conteniendo el emisor y el receptor), la expresión propuesta por Pierce para la presión difractada toma la forma:

$$p_{Dif}(r, \theta) = \frac{e^{jkl}}{L} \frac{e^{jp/4}}{\sqrt{2}} [A(X_+) + A(X_-)] \quad (1)$$

siendo:

$$|X_{\pm}| = |\Gamma M_n(J_0 \pm J)|,$$

$$M_n(J_0 \pm J) = \frac{\cos np - \cos n(J_0 \pm J)}{n \sqrt{1 - \cos np \cos n(J_0 \pm J)}}, \quad \Gamma = \sqrt{\frac{kr_0 r}{p(r_0 + r)}}$$

función que depende de las distancias fuente – borde difractor – receptor y de los ángulos de emisión y difracción (figura 1), en la que $n = p/\beta$

Aproximaciones de la función f(X)

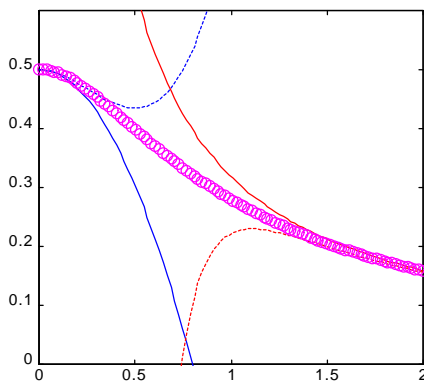


Figura 2a

La función $A(X)$ es la función integral:

$$A(X) = \frac{\sqrt{2}}{2p} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-u^2} du}{\sqrt{p/2 X - e^{-jp/4} u}} \quad (2)$$

que a su vez puede expresarse a través de las integrales de Fresnel:

$$A(X) = \text{sign}(X) [f(|X|) - jg(|X|)] \quad (3)$$

Esta función no es sencilla de evaluar si no se dispone de tablas apropiadas y/o programas específicos de cálculo. Pierce propone sendos desarrollos en serie aplicables para valores pequeños del argumento X:

$$f(x) = 1/2 - (p/4)x^2 + (p/3)x^3 - \dots$$

Aproximaciones de la función g(X)

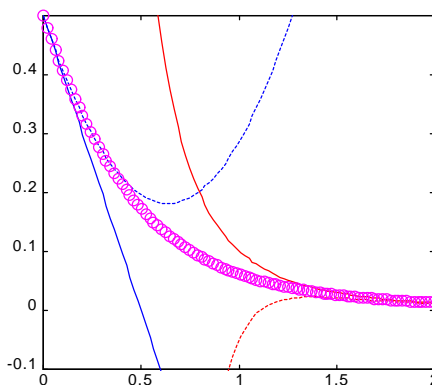


Figura 2b

$$g(X) = 1/2 + (p/4)x^2 - \dots \quad (4)$$

y para valores grandes:

$$\begin{aligned} f(X) &= 1/(pX) - 3/(p^3 X^5) \\ + \dots \\ g(X) &= 1/(p^2 X^3) - 15/(p^4 X^7) \\ + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

En las condiciones normales de aplicación, es decir para situaciones alejadas del vértice difractor, sucede que $|X| > 2$ y de la segunda serie de

desarrollos asintóticos es suficiente con los primeros términos de las mismas. Por otra parte, el algoritmo simplificado que propone Pierce para los casos en que $|X| > 2$ no puede utilizarse, ya que justamente para estas situaciones de edificios con varias terrazas y calles mas o menos anchas (del orden de 30 m) el argumento de la función X presenta valores entre 0.4 y 2, con lo que no son utilizables los desarrollos en series alternantes para pequeños valores de X ni para valores grandes. Las figuras 2a y 2b muestran la variación con X (entre 0 y 2) de

los primeros términos de los desarrollos asintóticos de $f(X)$ y $g(X)$ con un solo término (línea de trazo continuo) y de las series con dos términos (líneas de trazo discontinuo).

En este trabajo utilizamos, como una alternativa con suficiente grado de aproximación a las correspondientes funciones auxiliares de Fresnel, las funciones propuestas por C. Hastings [4] cuyo error respecto de los valores calculados a través de aquellas es menor de 2×10^{-3} :

$$f(X) = \frac{1 + 0.926 X}{2 + 1.792 X + 3.104 X^2} + e(X) \quad (6)$$

$$g(X) = \frac{1}{2 + 4.142 X + 3.492 X^2 + 6.670 X^3} + e(X) \quad (7)$$

En las figuras 2a y 2b estas funciones se han representado en trazo grueso. La comparación de estas funciones con las funciones integrales de Fresnel conducen a desviaciones menores de 0,002 para el intervalo $0 < X < 5$ y menores de 0,001 para valores de $X > 5$.

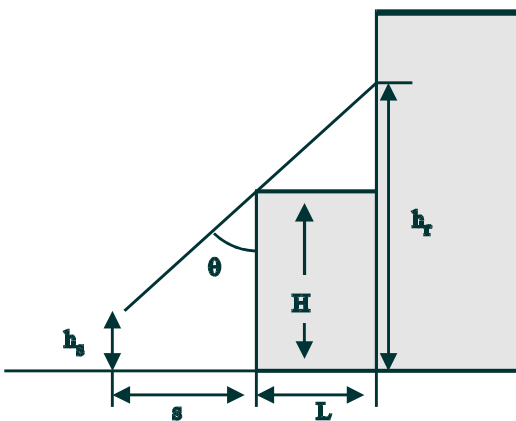


Figura 3.

El conjunto de ecuaciones 1 a 7 se utilizarán en la representación de los mapas de presiones difractadas o de pérdidas por inserción. Se ha creído conveniente presentar un estudio de casos en los que se compara el campo acústico al que se ve sometida una fachada de vivienda de un edificio escalonado frente a un edificio tradicional con fachada plana. Los diferentes casos corresponden a situaciones habituales de posibles situaciones o ubicaciones.

En el caso del edificio escalonado, se trata de poder predecir el retranqueo mínimo de las terrazas, de forma de rentabilizar la protección debida a la difracción por diedros. El cálculo se ha simplificado, de forma que solo se incluyen las contribuciones del campo acústico directo mas las del difractado. No se incluyen las reflexiones producidas por el plano del suelo, suponiendo además que se trata de una calle en L ; por la misma razón, tampoco se consideran las reflexiones en la fachada del edificio.

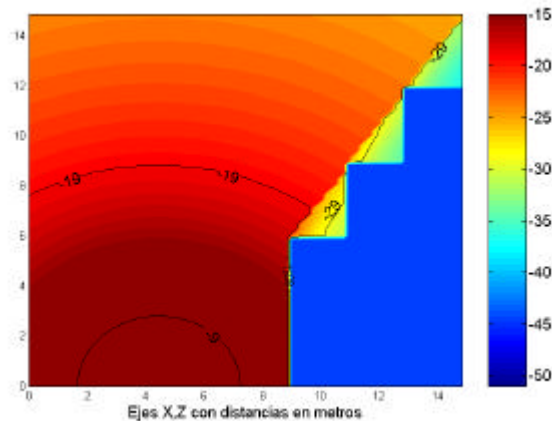


Figura 4

La protección mínima para el caso de una azotea, corresponde a una situación de "iluminación" directa. El interés radica en conseguir una azotea de profundidad mínima que ofrezca una protección suficiente, respecto al nivel de ruido incidente, a la fachada de ese escalón.

La profundidad de la terraza, L , es función de la altura de la fachada correspondiente al escalón y del ángulo de incidencia. de la misma respecto del plano en que se sitúa el emisor, pudiendo expresarse por (figura 3):

$$L \leq \frac{hr - H}{H - hs} S \quad (8)$$



En este caso la difracción considerada es la correspondiente al vértice del diedro que forma la esquina de la terraza. Si esta relación no se cumple, habrá zonas de la fachada que carezcan de protección, siendo la única ganancia la debida a la pérdida por distancia correspondiente al retranqueo.

En la figura 4, se muestra la protección obtenida para un edificio de 15 m de altura y de cuatro escalones que cumplen con las proporciones dadas por la ec.(8). En esta figura, se presenta el campo acústico directo y difractado, creado por una fuente situada a 4.5 m de la fachada (automóvil; frecuencia de emisión 630 Hz, representativa del ruido de tráfico)

Una posible forma de aumentar el área protegida por el escalón consiste en la instalación de una barandilla de obra al borde de la azotea (imprescindible si ésta es transitable), de esta forma la relación (8) se transforma en:

$$L \leq \frac{hr - H - b}{H - hs + b} S \quad (9)$$

donde b es la altura de la barandilla.

En esta expresión se puede comprobar que para una misma altura de fachada se necesita un menor retranqueo para obtener la misma protección. Además en este caso el proceso de difracción ya no se debe a un diedro sino al borde superior de la barandilla, que actúa como pantalla acústica [6]. También se debe señalar que, debido a la dependencia con la frecuencia del fenómeno de la difracción las frecuencias a partir de las cuales se debe considerar la difracción por un borde será función de la altura de la barandilla. En la figura 5 se muestra la mejora de la protección para el mismo edificio de la figura anterior, por el hecho de instalar una barandilla.

Con objeto de tener una idea de la mejora de protección acústica de las edificaciones en zigurat, frente a las prismáticas, en la tabla 1 se muestran las diferencias del incremento de presión acústica que un edificio de fachada plana presenta para posiciones de recepción idénticas que un edificio de fachada escalonada. Se trataría de una calle con dos vías de circulación de 3m cada una y dos aceras también de 3m. El edificio consta de tres terrazas no visitables; la primera situada a 7m de altura y las restantes a 10 y 13m respectivamente, con un retranqueo en todas ellas de 2m de profundidad. Suponiendo un nivel de presión acústica de 85.3 dB a 7m de distancia de las fuentes de ruido.

Tabla 1

Piso (terracea)	Ed. prismático	Ed. Escalonado	Dif. de nivel
1º	68.57	58.91	9.66
2º	66.47	55.87	10.6
3º	64.69	53.30	11.4

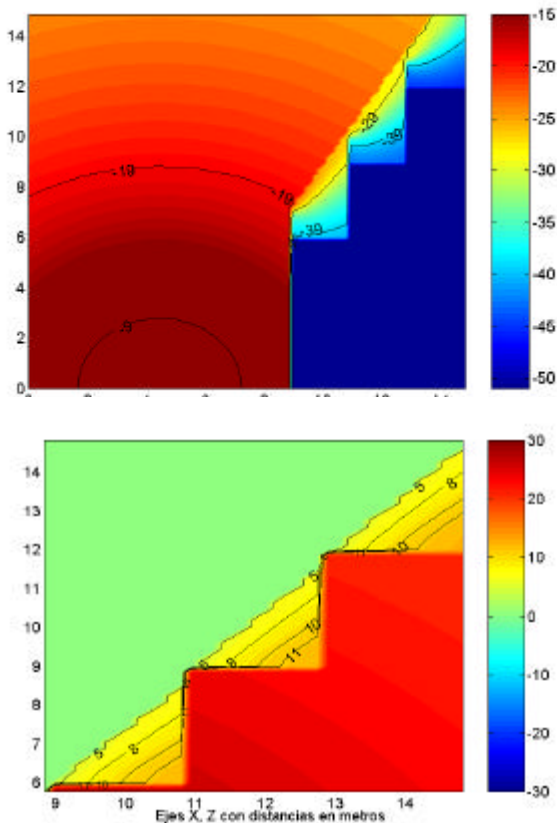


Figura 6

Otro criterio de comparación podría consistir en comparar los niveles de presión acústica en las fachadas de cada escalón con los niveles que habría en la fachada de un edificio prismático situado en la posición de cada escalón. Estas diferencias se presentan en la figura 6.



CONCLUSIONES

Se presentan las ventajas que desde el punto de vista acústico ofrece la construcción de edificios escalonados frente a edificios prismáticos. En el caso de difracción por diedros se pueden esperar protecciones medias de 3 y 5 dB, mientras que si estos diedros vienen suplementados con pantallas adicionales (barandillas) la protección media puede alcanzar los 6 o 7 dB.

En este trabajo se aplica por primera vez las expresiones de Hutchings como sustitución de las integrales de Fresnel en la solución de del campo acústico, lo que simplifica los cálculos, el tiempo de ejecución y amplía el dominio de validez de las expresiones utilizadas hasta ahora (Pierce y otros).

Queda abierto el estudio para la comprobación de la disminución del efecto cañón que se produce en calles con edificios a ambos lados, debido al aumento progresivo de la anchura de la calle con la altura y por tanto a la desaparición de parte del campo reflejado en ellos.

RECONOCIMIENTOS

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

BIBLIOGRAFÍA.

- A. D. Pierce, Diffraction of sound around corners and over wide barriers. J. Acoust. Soc. Am. ,56, 5, 941-955, 1974
- A.D. Pierce, Acoustics, Ed. Acoustical Society of America, New York, 1994.
- W.J Hadden, A.D. Pierce, Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations., J. Acoust. Soc . Am. ,.69, 5, 1266-1276, 1981.
4. U. K. Kurze., Noise reduction by barriers., J. Acoust. Soc. Am., 55, 3, 504-518, 1974.
- F. Oberhettinger, Diffraction of waves by a wedge., Commun. Pure Appl. Math. Soc. 7, 551-564, 1954.
- C. Hastings, Jr., Approximation Newsletter, April, Note 10, 1956.
- C. H. Chew, K. B. Lim, Facade Effects on the Traffic Noise from the Expressway, Applied. Acoustics, 41, 47-62, 1994.

