

ESTUDIO DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DEL SUELO

PACS 43.28.En

A.M. Abascal*, J. González*, A. Tarrero**, M. Arenal*

*Dpto. Física Aplicada de la ETS de Arquitectura

**Dpto. Termodinámica y Física Aplicada de la E.U.P.

Universidad de Valladolid.

Avenida de Salamanca s/n. 47014 Valladolid

Tfno: 983423446.

Email: abascal@modulor.arq.uva.es, juliog@opt.uva.es, ana@sid.eup.uva.es

SUMMARY

When we want to know the influence of the floor in the propagation of the sound, the parameter to consider is the impedance of the floor. In this communication we expose the values obtained for the normalized impedance "z" by means of indirect measure procedures. The acoustic measures were carried out simultaneously with the measure of the meteorological variables.

INTRODUCCIÓN

En el estudio de la propagación del sonido se observan varios elementos que tienen una clara influencia, según se pone de manifiesto por diversos investigadores como [1], [2], [4]. El suelo, junto con los parámetros meteorológicos son unos de los factores de mayor importancia en la propagación. La contribución de las variables meteorológicas es importante sobre todo cuando se produce turbulencia y para grandes distancias. Sin embargo para distancias cortas o para situaciones de calma su efecto no es significativo y en primera aproximación se puede ignorar. El elemento ineludible que se debe considerar cuando se estudia la propagación en medios exteriores en puntos no muy distantes de la superficie es el suelo.

Para caracterizar la influencia del suelo sobre la propagación del sonido, el parámetro a considerar es la impedancia acústica, definida como el cociente entre la presión acústica y la velocidad de vibración de las partículas, ambas magnitudes expresadas de forma compleja. La determinación de este parámetro no es inmediata. Se idearon diferentes formas y métodos de medida que podemos agrupar en dos apartados:

- Métodos directos
- Métodos indirectos

La evaluación por métodos directos mediante un montaje específico para este fin, como puede ser el tubo de impedancias u otros expuestos en la bibliografía, presenta numerosos inconvenientes, sobre todo para el caso de algunos materiales, entre otros motivos, por la dificultad que entraña disponer de muestras en condiciones semejantes a como se encuentra el material en su estado "normal". Sin embargo para los casos en que las muestras se acomodan al montaje experimental sin variar significativamente sus características físicas, la medida directa puede ser bastante exacta y por tanto preferible frente a la medida por procedimientos indirectos. Por otro lado, el procedimiento indirecto, básicamente, consiste en comparar el nivel de presión medido en un punto con el deducido a partir de un modelo teórico. Esta forma de calcular la impedancia del suelo exige la medida simultánea, a la vez que los niveles acústicos y los parámetros meteorológicos.

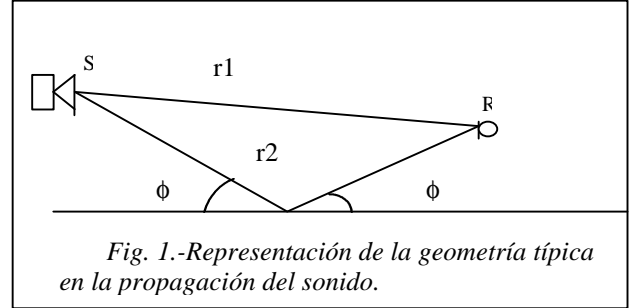
En la bibliografía se desarrollan diversas formulaciones o modelos que se acomodan, con mejor o peor fortuna, a los datos experimentales dependiendo de los factores que tomen en consideración y del grado de aproximación de las hipótesis de partida a la situación real en el instante de la medida. Dentro de los modelos teóricos que se establecen en la bibliografía seleccionaremos, para nuestro cálculo, los desarrollados por Attenborough [1] y por Delany-Bazley [3]. El trabajo que desarrollamos en esta comunicación trata de determinar los valores de impedancia en un medio exterior por métodos indirectos.

DESARROLLO TEÓRICO

Como comentamos en el apartado anterior, existen varios modelos que predicen la propagación del sonido en presencia de suelo. El punto de partida de estos modelos se basa en la propagación del campo electromagnético, incorporando ciertas variables o parámetros que ponen de manifiesto las características del medio de propagación. Los modelos desarrollados hasta el momento no describen en su totalidad todos los extremos y para seguir avanzando se hace necesario realizar nuevas comprobaciones que permitan afianzar el camino recorrido y proponer innovaciones que aproximen más los valores previstos a los experimentales.

Los modelos teóricos parten de un foco sonoro situado sobre el suelo a una altura h_s y de un receptor situado a una altura h_r .

El receptor, en ese punto, percibe la composición de los rayos directo con el reflejado por el suelo. En la figura 1 se representa de forma esquemática esta situación.



La expresión para la presión acústica P , siguiendo la bibliografía consultada, viene dada por la ecuación (1), en la que P_0 es la presión sonora a una distancia de referencia r_0 tomada como referencia que verifica la relación $k_1 r_0 = 1$.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2} + \frac{(1 - R_p) F(w) e^{jk_1 r_2}}{k_1 r_2} \quad (1)$$

Mediante este término se toma en consideración la emisión de la fuente y por tanto el cociente es independiente de la fuente.

$$R_p = \frac{Z_2 \sin \mathbf{f} - Z_1 \left[1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \cos \mathbf{f} \right)^2 \right]^{1/2}}{Z_2 \sin \mathbf{f} + Z_1 \left[1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \cos \mathbf{f} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2)$$

$$F(w) = 1 + j\sqrt{\Pi w} e^{-w} \operatorname{erf}(j\sqrt{w}) \quad (3)$$

$$w = j \frac{2k_1 r_2}{(1 - R_p)^2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \cos^2 \mathbf{f} \right] \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores k_1 , k_2 son los números de onda del aire y del suelo; r_1 , r_2 , ϕ son las distancias directa, reflejada y el ángulo complementario al de incidencia (términos que definen la geometría) y, Z_1 , Z_2 son las impedancias específicas del aire y del suelo, respectivamente. En esta expresión el parámetro desconocido es la impedancia, Z_2 y podemos determinar su valor al comparar los valores obtenidos mediante el modelo con los medidos experimentalmente.

Esta formulación está desarrollada para el caso de la propagación sobre los suelos llamados de extensión reactiva (extended reaction), lo que significa que la impedancia es dependiente del ángulo de incidencia. Éstos son los que tienen una formulación más compleja. Otra variedad de suelos son los denominados localmente reactivos (locally reacting), en los que la impedancia es independiente del ángulo de incidencia, que son un caso simplificado de los de extensión reactiva.

La impedancia acústica da idea del comportamiento del suelo al incidir una onda. Su expresión es función de la frecuencia y de algún parámetro relativo a las características mecánicas y de composición del suelo, por tanto se hace necesario establecer la dependencia funcional de Z con estas variables. Esta formulación empírica de la impedancia del suelo se ha desarrollado por varios grupos de investigación, como es el caso de K. Attenborough [1] o Delany – Bazley [3]. Ambos grupos llegan a la conclusión de que la impedancia se puede definir en función de la frecuencia y en función de un parámetro que define la tipología del suelo, llamado resistividad al flujo $[\sigma]$. Las ecuaciones de Delany – Bazley se presentan en las ecuaciones (5) y (6), expresadas en el sistema c.g.s. La formulación de K. Attenborough se expresa en la ecuación (7), en el S.I.

$$\frac{Z_2}{Z_1} = 1 + 9.08 \left(\frac{f}{s} \right)^{-0.75} + 11.9i \left(\frac{f}{s} \right)^{-0.73} \quad (5)$$

$$\frac{K_2}{K_1} = 1 + 10.8 \left(\frac{f}{s} \right)^{-0.7} + 10.3i \left(\frac{f}{s} \right)^{-0.59} \quad (6)$$

$$\frac{Z_2}{Z_1} = 0.218 \left(\frac{s}{f} \right)^{0.5} (1 + j) \quad (7)$$

Existen otras ecuaciones más complejas en las que se añaden más parámetros para definir el suelo, pero no las tratamos aquí aunque posteriormente volveremos sobre esta cuestión.

MONTAJE EXPERIMENTAL

La metodología seguida para obtener los valores de la impedancia en función de la frecuencia ha sido la siguiente. Se eligió una zona para realizar las medidas acústicas que reuniera unas condiciones de medida adecuadas, como son:

- Bajo ruido de fondo.
- Superficie extensa y plana donde no existan obstáculos que puedan generar reflexiones distintas a las del suelo.
- Posibilidad de conocer los valores de los parámetros meteorológicos.

El lugar que cumple estos requisitos es el Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (CIBA) de la Universidad de Valladolid ubicado en La Mudarra, localidad de la provincia de Valladolid situada a 40 km de distancia, en dirección nornoroeste. El suelo tiene una tipología arenosa y compacta, cubierto de forma aleatoria con vegetación de hierbas leñosas de unos 30 cm de longitud y entre 1 y 2 mm. de diámetro.

El equipamiento usado para las medidas consistió en un analizador de espectros de B&K, modelo 2144, una fuente sonora de B&K modelo 4224, dos micrófonos de B&K modelo 4129, un multiplexor B&K modelo 2811 y un analizador portátil de B&K modelo Investigator 2236. Mediante la introducción del multiplexor permitió realizar todas las medidas de forma simultánea.

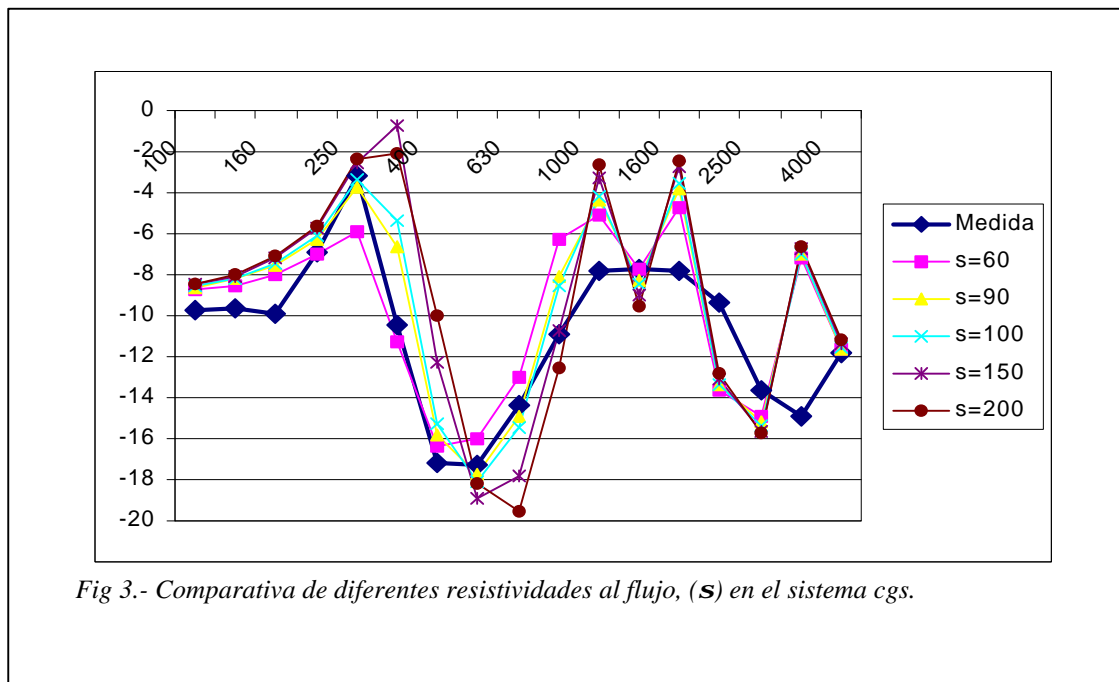
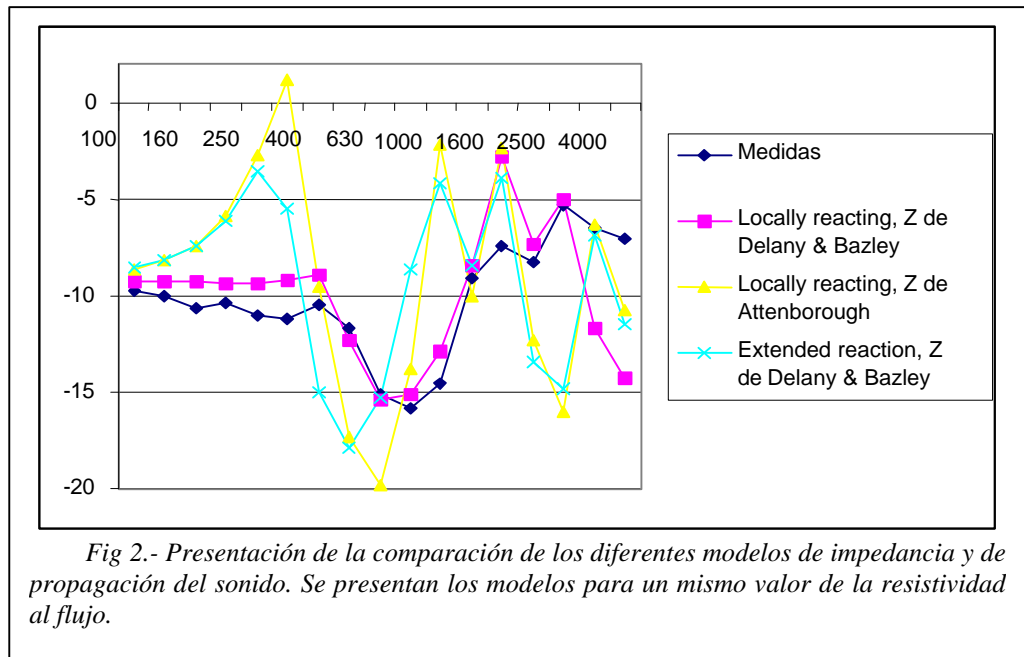
Para la determinación de la impedancia del suelo se dispuso de un montaje de 8 micrófonos, 7 de ellos estaban conectados al multiplexor y el octavo al Investigator.

Se realizaron medidas de nivel de presión sonora a una altura del receptor 1.3 m, altura de la fuente 1m y a una distancia de separación horizontal micrófono – fuente de 15 m. Esta distancia de separación se eligió para que limitar la influencia de las variables meteorológicas y de turbulencia asociada. Para evitar la influencia de la fuente se calculó la diferencia de nivel de presión sonora entre dos puntos. La otra geometría elegida tenía una separación fuente – micrófono de 5 m, la altura de la fuente 1 m y la altura del micrófono de 1.3 m.

VALORES OBTENIDOS Y RESULTADOS

Se realizaron varias medidas con la geometría anteriormente expuesta y con ellas se hicieron las medias aritméticas. Los cálculos teóricos de la atenuación respecto a un valor

tomado como referencia, el N.P.S. a una altura de 1.3m separado 5m de la fuente, se realizó con el programa MATHEMATICA. En el cálculo del N.P.S. con el ordenador se ensayaron diferentes modelos, además del expuesto (figura 2). Se tomaron distintos valores de la resistividad al flujo (figura 3) para el modelo de Delany-Bazley para suelos localmente reactivos, el de mayor



aproximación a los resultados medidos. De estos cálculos se encontró que el valor de sigma para el que mejor se aproximan los resultados teóricos está comprendido entre 90 y 95, en unidades del sistema cgs. Una vez determinado el valor de resistividad al flujo para el que coinciden las medidas con los resultados teóricos, se pudo calcular la impedancia normalizada del suelo, cuyos valores se presentan en la tabla 1.

En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos por otros autores, en concreto por Chessell [2] en el que se pueden ver las discrepancias entre los modelos teóricos utilizados por su grupo de investigación y sus resultados experimentales.

Se hicieron análogos cálculos con medidas en distintas geometrías, encontrándose resultados iguales.

A partir del valor de la resistividad al flujo y con la ecuación (5), se calculó el valor de la impedancia normalizada, que se presenta en la tabla 1.

CONCLUSIONES

Una vez observadas las figuras presentadas en este texto, se puede indicar que, de los modelos elegidos de propagación del sonido, el que más se ajusta a nuestras características es el de suelo localmente reactivo (locally reacting). También se ha observado que el modelo de impedancia que más se aproxima es el desarrollado por Delany & Bazley [3]. Estos dos modelos no se ajustan en todo el rango de frecuencia, pero es bastante aproximado en el intervalo de frecuencias en el que trabajamos.

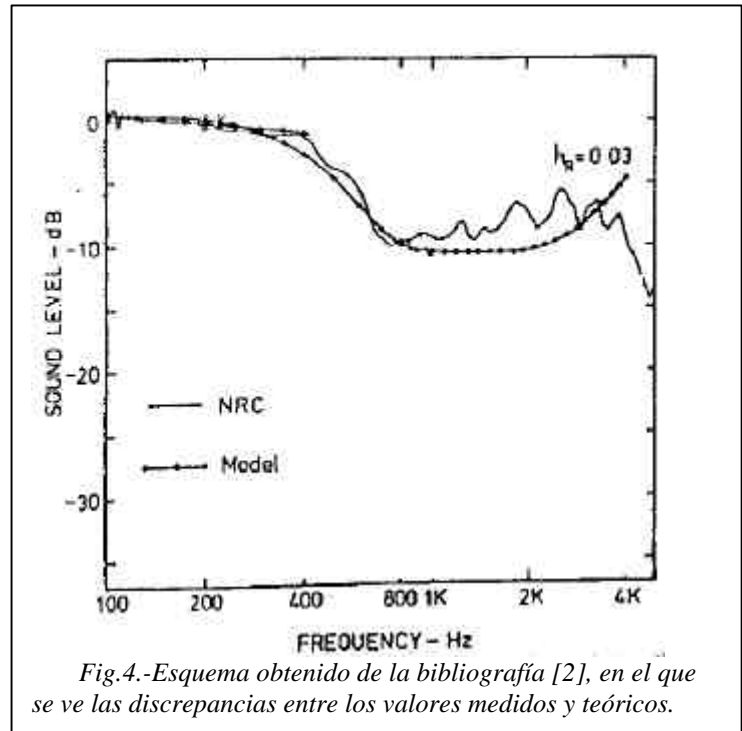


Fig.4.-Esquema obtenido de la bibliografía [2], en el que se ve las discrepancias entre los valores medidos y teóricos.

Freq.	Z/rc
100	9.390111465 + 11.01904593 I
125	8.097170208 + 9.362669297 I
160	6.897632999 + 7.818733417 I
200	5.988790126 + 6.643425919 I
250	5.220002654 + 5.644789964 I
315	4.548418340 + 4.768450614 I
400	3.966352356 + 4.005347488 I
500	3.509228591 + 3.403265962 I
630	3.109902168 + 2.874917538 I
800	2.763803664 + 2.414839676 I
1000	2.491996247 + 2.051842368 I
1250	2.262075165 + 1.743410607 I
1600	2.048763933 + 1.455916292 I
2000	1.887146276 + 1.237063794 I
2500	1.750434383 + 1.051109078 I
3150	1.631007927 + .8879270549 I
4000	1.527500332 + .7458306034 I

Tabla 1. Valores de la impedancia del suelo estudiado en función de la frecuencia.

De todos los valores probados para el parámetro resistividad al flujo (figura 3), para el suelo en estudio, el que ha producido mejor ajuste es el de valor 90, en unidades del sistema cgs [g/(s cm²)].

La falta de ajuste en algunas frecuencias se puede atribuir a la contribución de las variables climatológicas, en especial velocidad de viento, que a pesar de la cercanía de la fuente y de los micrófonos, no se ha podido evitar su influencia sobre la propagación.

Es posible que se hubiera podido obtener un ajuste mejor teniendo en cuenta modelos de impedancia más complejos, con más parámetros a ajustar. De todos modos el aumento de

trabajo que esta opción supondría y la poca mejora de los resultados, nos hizo abandonar esta idea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Attenborough, K "A note on short-range ground characterization". J.A.S.A. 95, (6); 1994.
- [2] Chessell, C. I. "Propagation of noise along a finite impedance boundary". J.A.S.A. Vol 4; October 1977.
- [3] Delany, M. E.; Bazley, E. N. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials". Applied Acoustics, 3, 1970.
- [4] Embleton, T. F. W.; Piercy, J. E.; Daigle, G. A. "Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements". J.A.S.A. 74, (4); October 1983.
- [5] Embleton, T. F. W.; Piercy, J. E.; Olson, N. "Outdoor sound propagation over ground of finite impedance". J.A.S.A. Vol 59; No 2; February 1976.
- [6] Thomasson, S. I. "A powerful asymptotic solution for sound propagation above an impedance boundary". Acustica, Vol 45; 1980.

AGRADECIMIENTOS

Queremos manifestar nuestro agradecimiento a los responsables del CIBA por su colaboración en este trabajo. De la misma forma queremos agradecer su inestimable colaboración al Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid, a su responsable y a su personal de acústica.