

## **EVALUACIÓN DE LA RESISTIVIDAD AL FLUJO $s$ EN DISTINTOS TIPOS DE SUELOS POR EL MÉTODO INDIRECTO**

REFERENCIA PACS 43.28.En

A.I. Tarrero Fernández <sup>1</sup>; J. González Suárez <sup>2</sup>; M<sup>a</sup>. Machimbarrena Gutiérrez <sup>2</sup>; M. Arenal <sup>2</sup>

1 Dpto. de Termodinámica y Física Aplicada. E.U.Politécnica. Universidad de Valladolid

Francisco Mendizábal s/n.

47014 Valladolid. España

Tel: 34 983 423 500 Fax: 34 983 423 490

E-Mail: ana@sid.eup.uva.es

2 Dpto. de Física Aplicada.E.T.S. Arquitectura. Universidad de Valladolid

Avenida Salamanca s/n.

47014 Valladolid. España

Tel: 34 983 423 446

E-Mail: juliog@opt.uva.es

### **ABSTRACT**

When we try to study outdoor sound propagation, one of the main factors to keep in mind it is the presence of the ground. This effect is investigated by many scientists and nowadays can be approached from two points of view. The first method tries to determine ground impedance by making direct measures, and the second is based on theoretical models both for propagation and ground impedance. In this second method, the pressure results obtained from the model are compared to the experimental values and thus the ground characteristics are deduced. In this paper the results according to the second method will be shown, for six different types of grounds.

### **RESUMEN**

Al tratar de estudiar la propagación del sonido en exteriores uno de los factores principales a tener en cuenta es la presencia del suelo descrita por su impedancia acústica. Esta influencia es tema de investigación por distintos grupos y en la actualidad el estudio se aborda desde dos puntos de vista: uno intenta determinar la impedancia mediante medidas directas y otro basa su desarrollo en establecer modelos, tanto de impedancia como de propagación, y deducir las características del suelo comparando los datos obtenidos para la presión acústica a partir del modelo con los medidos experimentalmente. En este trabajo se exponen los valores obtenidos por este último método para seis tipos de suelos.

### **INTRODUCCIÓN**

Cuando el sonido se propaga en el exterior a través de la atmósfera, libre de obstáculos excepto por la presencia del suelo, el nivel de sonido en un punto situado a cierta distancia de la fuente, es la composición de los sonidos directo y reflejado en el suelo que se ven afectados por una disminución del nivel consecuencia de la distancia entre fuente y receptor, divergencia geométrica, y por la absorción del aire. En consecuencia el nivel en un punto depende de la potencia de emisión de la fuente, del efecto del suelo y de las variables meteorológicas. Si las distancias entre fuente y receptor no son grandes y las variables meteorológicas, como velocidad de viento y gradientes de temperatura, son tales que no contribuyen mucho a modificar la

dirección de los rayos sonoros se puede evaluar con cierta precisión la "capacidad" del suelo para influir sobre la propagación del sonido.

En este trabajo nos vamos a centrar únicamente en el efecto del suelo y para ello las medidas se han realizado en grandes espacios abiertos, sin obstáculos, con bajo ruido de fondo y con velocidades de viento, en alturas cercanas al suelo, insignificantes.

A la hora de caracterizar el comportamiento de los suelos ante la incidencia de ondas, en este caso acústicas, el parámetro principal a considerar es la resistividad al flujo  $\sigma$ . Existen diferentes métodos de evaluación que podemos agrupar en dos apartados fundamentales: métodos indirectos y métodos directos. En nuestro caso la forma de evaluación se centra en el primer método y se basa en la aplicación de modelos predictivos de propagación en exteriores en los que interviene  $\sigma$  a través de la impedancia del suelo incorporada mediante modelos como el de Delany entre otros. Al comparar valores de niveles predichos por el modelo, con los obtenidos experimentalmente, se puede deducir el valor del parámetro. De esta forma se han evaluado los valores de  $\sigma$  para seis tipos de suelo y se exponen los valores obtenidos.

## MODELO TEÓRICO

### Propagación del Sonido en Exteriores

Para estudiar los efectos del suelo se han desarrollado distintos modelos teóricos, que, en mayor o menor medida, se ajustan a los resultados experimentales. En este trabajo se ha utilizado el de K. Attenborough [2] (basado en el modelo teórico de Weyl van der Pol para la reflexión de ondas electromagnéticas sobre un plano conductor) que calcula el campo de presión sonora emitido por una fuente puntual. En la figura 1 se representa el esquema de trazado de rayos, se emiten desde un punto emisor S, posición de la fuente, y concurren en un punto R, posición del receptor. Según este modelo, la presión acústica en el punto R viene dada por la expresión (1)

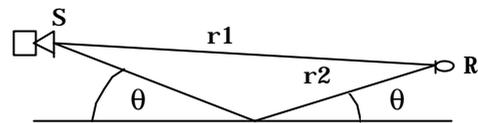


Fig.1.-Esquema del trazado de rayos

$$P = P_i \frac{e^{jk_1 r_1}}{r_1} + P_i Q \frac{e^{jk_1 r_2}}{r_2} \quad (1)$$

$$Q = R_p + (1 - R_p) F(w) \quad (2)$$

$$F(w) = 1 + j\sqrt{\pi w} e^{-w} \operatorname{erf}(j\sqrt{w}) ; W = ik_2 [\cos(\theta) + \beta]^2 / 2$$

Donde  $r_1$  y  $r_2$  son las longitudes de los rayos directos y reflejados respectivamente,  $P_i$  es la amplitud de presión de la fuente,  $k_1$  es el número de onda en el aire,  $k_2$  es el número de onda en el suelo y  $Q$  representa el coeficiente de reflexión de ondas esféricas dado por la expresión (2).  $\theta$  es el ángulo representado en la figura 9,  $R_p$  es el coeficiente de reflexión de ondas planas, y  $\beta$  es el complejo conjugado de la admitancia  $=1/Z$  donde  $Z$  es la impedancia.

### Cálculo de la Resistividad al Flujo ( $\sigma$ )

La impedancia del suelo depende de un parámetro característico llamado resistividad al flujo  $\sigma$  y la expresión de su relación con  $Z$  se establece mediante modelos. En nuestro caso hemos tomado el modelo de Delany que viene dada por la ecuación:

$$Z = 1 + 0.0571(\sigma/fp_0)^{0.754} + i0.087(\sigma/fp_0)^{0.732}$$

Donde  $\sigma$  es la resistividad efectiva del suelo, expresada en unidades del Sistema Internacional, Rayls  $m^{-1}$ . Si  $r_1$ ,  $r_2$  y  $Q_r$  se refieren al micrófono de referencia y  $t_1$ ,  $t_2$  y  $Q_t$  se refieren al micrófono receptor la atenuación puede ser calculada mediante la expresión (3) donde no se tiene en cuenta la absorción atmosférica.

$$\text{Atenuación} = 20 \log_{10} \left| \frac{e^{ikr_1} / r_1 + Q_r e^{ikr_2} / r_2}{e^{ikt_1} / t_1 + Q_t e^{ikt_2} / t_2} \right| \quad (3)$$

Se trata entonces de determinar el valor de  $\sigma$  comparando los valores obtenidos, para la atenuación, mediante el modelo, ecuación (3), con los obtenidos experimentalmente. El cálculo de la atenuación se efectuó utilizando el programa MAPLE V RELEASE 4.

### SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS (Lugares donde se efectuó el muestreo)

Para poder comparar los resultados obtenidos en varios tipos de suelos de características muy distintas se han elegido 6 lugares diferentes, todos ellos en la ciudad de Valladolid. Por sus características compositivas o su estado, hemos tipificado los suelos con las denominaciones siguientes: **Arado, Arenoso, Asfalto, Césped húmedo, Sembrado y Terregoso.**

**Arado:** Con la denominación de terreno arado pretendemos indicar que se trata de suelo donde se efectuaron labores de labranza. En este caso la parcela se había arado recientemente y por tanto la superficie era bastante irregular con abundancia de terrones o tabones como se acostumbra a denominar en algunas localidades.

**Arena:** Aprovechando que en la ribera del río Pisuerga en el lugar conocido como "La Playa de las Moreras" existe un suelo arenoso que hace las veces de playa se realizaron medidas para estudiar el comportamiento de este tipo de suelos. La arena suelta cubre una extensión no muy amplia aunque suficiente para la realización de este tipo de experiencias y tiene el inconveniente de que en las cercanías pasa una carretera de abundante tráfico por lo que las medidas se ven afectadas, sobre todo, en los puntos de muestreo alejados de la fuente.

**Asfalto:** Al tipificar el suelo como de asfalto nos referimos a suelos especialmente duros como es el caso de firmes de calzadas, espacios cubiertos de hormigón, etc. La medida se realizó en el aparcamiento del nuevo estadio de fútbol del Real Valladolid. Este aparcamiento cubre una gran extensión de suelo cubierto con una capa de hormigón.

**Césped húmedo:** Con esta denominación describimos el caso de un suelo plano cubierto de hierba baja, es decir, césped bastante regular y uniforme por toda la superficie. Se trata de un campo de fútbol situado en los anexos del estadio. Esta superficie relativamente extensa tenía la particularidad de que durante la medida el suelo estaba muy húmedo debido a que había sido regado abundantemente.

**Sembrado:** Tierra sembrada con cebada de unos 50 cm de altura.

**Terregoso :** Con este nombre nos referimos a un suelo de arena muy compacta, dura, corresponde a un campo de fútbol situado también en los anexos del estadio.

### MEDIOS EXPERIMENTALES Y ESTRATEGIA DE MEDIDA

El equipo que se utilizó para la realización de las medidas, era de la casa B&K y básicamente estaba constituido por:

- Fuente sonora, modelo 4224
- Calibrador modelo 4230
- Analizador modular 2260 (Investigator).

Las medidas se llevaron a cabo los días 28 de mayo y 1 de junio de 1999, entre las 8:30 y las 11 de la mañana por ser las horas del día en las que la velocidad del viento era inapreciable. Los parámetros medidos fueron el  $L_{eq}$  con ponderación lineal en tercios de octava y el  $L_{eq}$  global con ponderación lineal y con ponderación A. La duración de cada medida fue de 1 minuto y las distancias que se tomaron entre fuente y receptor de 10, 20, 40 y 80 metros.

En cada lugar se midió el ruido de fondo para comprobar que era mucho menor que el nivel medido con la fuente encendida (excepto en el caso de la arena por ello la medida a 80 m no se ha considerado). En todo momento la altura de la fuente fue de 75 cm y la del micrófono de 1m.

**VALORES OBTENIDOS PARA S**

Nuestro propósito es comparar la atenuación teórica obtenida a partir del modelo con los valores obtenidos experimentalmente. El valor medido a 10 m de la fuente se toma como referencia y la atenuación experimental en cada punto se calcula mediante la expresión:

$$\text{Atenuación} = (\text{nivel medido a una distancia } d) - (\text{nivel medido a } 10 \text{ m})$$

donde d es la distancia entre fuente y receptor, que como se ha indicado anteriormente han sido d = 20, 40 y 80 m. Al hacer esta diferencia se consigue que los resultados sean independientes de las características de emisión de la fuente.

Al comparar curvas no resulta inmediato elegir la que mejor se ajusta a los datos experimentales pues existen varias, deducidas con distinto valor de  $\sigma$ , que se aproximan mucho, por tanto, cabe dar un intervalo de valores mas que uno concreto [1]. Para poder elegir el intervalo mas adecuado en cada tipo de suelo los valores experimentales se han ajustado a los teóricos para distintos  $\sigma$  mediante el método de mínimos cuadrados (eligiéndose en cada caso el que hace que la suma de las diferencias al cuadrado sea mínima).

A modo de ejemplo en las figuras 2, 3 y 4 representamos los valores de la atenuación obtenidos experimentalmente (Val. Exp.) y los obtenidos con el modelo para el  $\sigma$  indicado en los casos de **arena**, **césped húmedo** y **asfalto** por ser suelos con valores de  $\sigma$  bajos, medios y altos respectivamente y por lo tanto previsiblemente muy diferentes entre sí. Además en dichas figuras se ha representado la atenuación para diferentes distancias en cada uno de los 3 suelos con el fin de poner de manifiesto la adecuación del modelo para distintos valores de distancias y de  $\sigma$ .

En las tres gráficas se observa la concordancia entre los valores teóricos y experimentales sobre todo a bajas y medias frecuencias. A altas frecuencias los valores teóricos se alejan más de los medidos experimentalmente, tal vez porque los sonidos a estas frecuencias están más influidos por los factores meteorológicos como pueden ser las turbulencias.

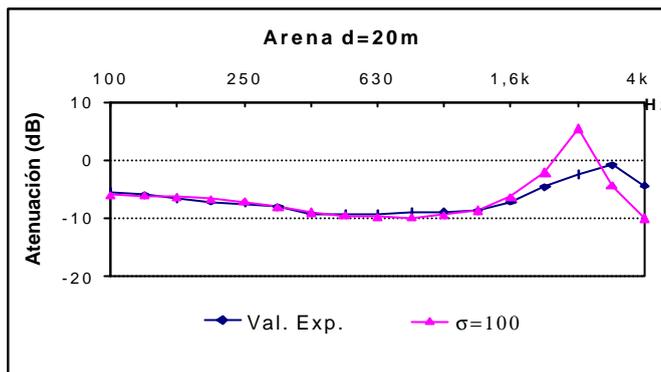


Fig.2.-Valores de la atenuación con suelo arenoso

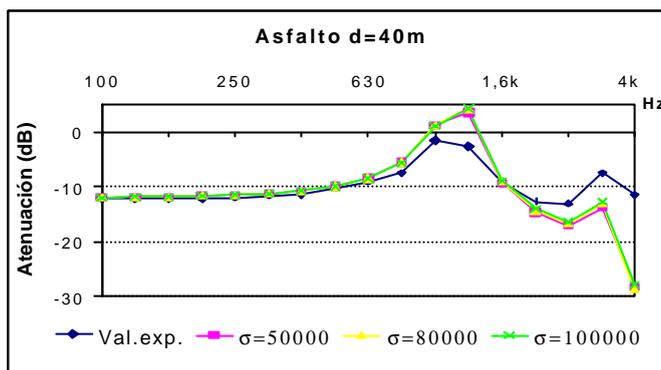


Fig.3.-Valores de la atenuación con suelo de hormigón

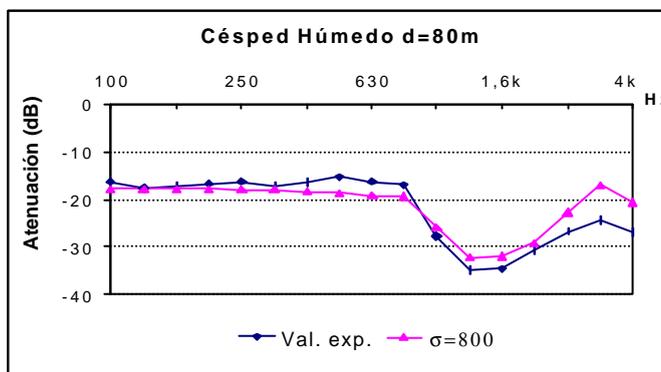


Fig.4.- Valores de la atenuación en césped recién regado

En el caso del asfalto hay que dar un intervalo muy amplio para la resistividad, sin poder precisar, se ha probado con valores muy diferentes de  $\sigma$  (de 10000 a 100000) y apenas se aprecian diferencias entre las curvas teóricas predichas por el modelo (fig.3).

En la figura 4 exponemos los valores obtenidos para el caso del césped húmedo, en ella puede apreciarse una buena concordancia entre los valores teóricos y los experimentales para la mayoría de las frecuencias. El valor de  $\sigma$  difiere considerablemente del que cabría esperar si fuera césped seco.

SUELOS	$\sigma$ (Rayls $m^{-1} \cdot 10^{-3}$ )
Arado	10-20
Arena	100-140
Asfalto	10000-100000
Césped húmedo	700-850
Sembrado	50-70
Terregoso	400-500

Tabla 1.- Intervalo de valores para la resistividad al flujo en cada suelo

Conforme a como se ha descrito se desarrolló el proceso con cada uno de los 6 suelos en estudio para calcular su resistividad al flujo y así tener determinada su impedancia característica. Los resultados que se han obtenido en cada caso se muestran en la tabla 1.

Con los datos obtenidos se observa que en el arado y en el sembrado se presentan mayores discrepancias entre los valores teóricos y experimentales, siendo más patente en el sembrado. Pensamos que ello es debido a la irregularidad de la superficie, en el caso del terreno arado, por la presencia de los terrones y en el caso del sembrado por estar cubierto el suelo de cebada de unos 50 cm de altura y en consecuencia en su comportamiento acústico no sólo intervienen los efectos del suelo, los únicos que se consideran en el modelo, sino que habrá que tener en cuenta otras influencias.

**ANÁLISIS COMPARATIVO  
ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS  
DE SUELOS**

En las figuras 5, 6 y 7 se representan en función de la frecuencia los valores experimentales de la atenuación de los 6 suelos para poder comparar unos con otros. En ellas se pone de manifiesto que el comportamiento acústico es distinto aunque, como es lógico, se aprecia una mayor diferencia conforme nos alejamos de la fuente. Es decir, para distancias próximas a la fuente, como ocurre en las gráficas de la figura 5, si bien se distinguen diferencias para los distintos tipos de suelos, estas no son muy pronunciadas sobre todo a bajas frecuencias. En las gráficas de la figura 6 ( $d = 40$  m) las diferencias son más acusadas siendo mucho más significativas para  $d=80$  m (fig.7). Otro detalle importante a considerar, que se pone de manifiesto de forma clara

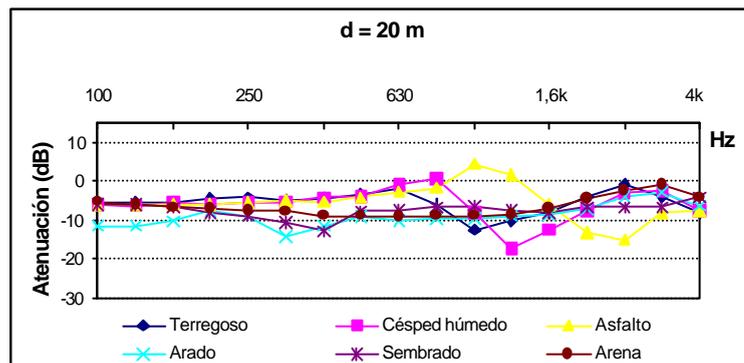


Fig.5. Atenuación de cada suelo a 20 m de la fuente

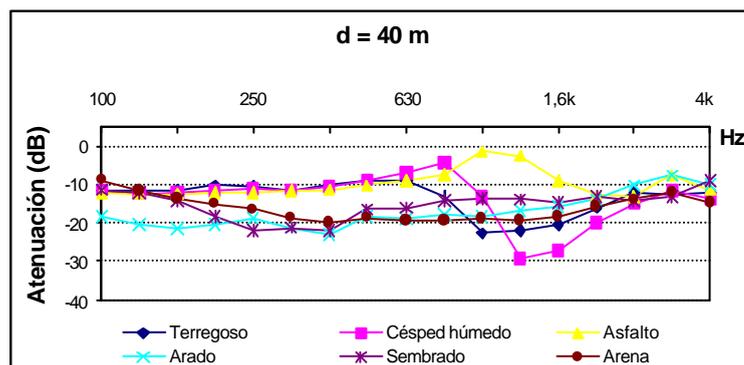
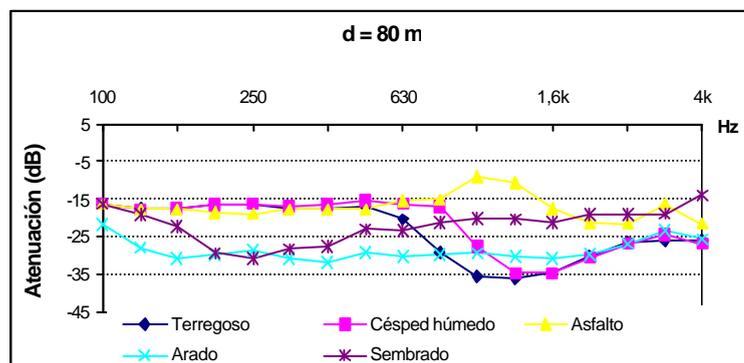


Fig.6. Atenuación de cada suelo a 40 m de la fuente



en estas gráficas, es que para la mayoría de los suelos la atenuación no es uniforme, frente a la frecuencia sino que se comporta de forma selectiva.

Una forma singular de comportamiento, para el caso de las tres distancias, se destaca para el arado donde aparece un valor de atenuación casi constante para todas las frecuencias, excepto si acaso en las extremas. Entendemos que ello es debido a la irregularidad del suelo en el sentido de que no hay una definición clara para la trayectoria del rayo reflejado en el suelo y por tanto la composición con el rayo directo para producir interferencias no se reduce a unas frecuencias determinadas sino que ocurre de una forma menos precisa.

Otra particularidad que se desprende de las gráficas de las tres figuras es que para bajas-medias frecuencias aparecen valores de atenuación similares para suelos muy distintos, como el terregoso, el césped húmedo y el asfalto. Para frecuencias mayores de 500 Hz el terregoso y césped húmedo difieren en alguna medida pero el aspecto de la gráfica es semejante y parece como si una estuviera trasladada respecto de la otra. A frecuencias comprendidas entre 800 y 2 kHz aproximadamente las atenuaciones del terregoso y del césped húmedo son máximas (mínimos en las gráficas) y difieren mucho de las del asfalto ya que son las frecuencias a las que presenta atenuación mínima (máximos en las gráficas).

En el sembrado cuanto mayor es la distancia entre fuente y receptor su comportamiento deja de ser igual para todas las frecuencias y atenúa mas para frecuencias menores de 800 Hz.

Con el fin de conocer el comportamiento de los 6 suelos a nivel global se ha medido también en cada punto el nivel equivalente total (con ponderación lineal y con ponderación A). Los resultados con ponderación A se representan en la fig. 8. En ella se puede apreciar que para distancias pequeñas (10 m) entre fuente y receptor la mayor diferencia de niveles se produce entre el asfalto y el sembrado y su valor es de 4,4 dBA, mientras que para grandes distancias (80 m) la mayor diferencia de niveles se obtiene entre el asfalto y el arado siendo su valor de 11,7 dBA. Todo esto pone de manifiesto la diferencia de comportamiento acústico entre los distintos tipos de suelos siendo más relevante cuanto mayor es la distancia entre fuente y receptor.

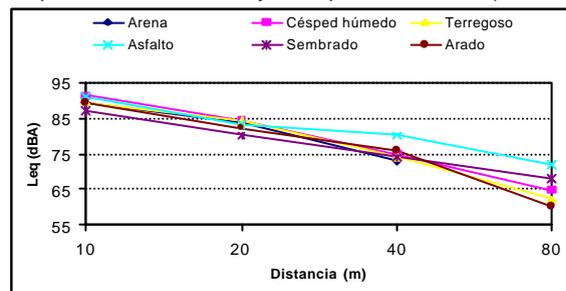


Fig.8 Nivel equivalente en función de la distancia fuente-receptor para cada tipo de suelo.

## CONCLUSIONES

Dado que el objetivo que nos hemos propuesto es aportar datos de  $\sigma$ , para distintos tipos de suelos, (tabla 1), que da idea de la impedancia de cada uno de ellos, de los datos obtenidos en las medidas podemos deducir que los 6 suelos en estudio tienen valores de  $\sigma$  muy diferentes tal y como cabría esperar de sus composiciones.

De esta forma encontramos que el terreno arado (con valores de  $\sigma$  bajos) es el que mas atenúa, y su comportamiento es similar prácticamente para todas las frecuencias. En el caso del césped húmedo y el suelo terregoso (con valores de  $\sigma$  medios) tienen comportamientos muy parecidos, y su atenuación apenas varía para bajas frecuencias pero disminuye mucho entre 630 Hz y 2000 Hz. Es de destacar la buena concordancia entre los datos experimentales y los aportados por el modelo. En el caso del asfalto (con valores de  $\sigma$  altos) es el que menos atenúa en general aunque para bajas frecuencias se aproxima al caso del césped húmedo y del terregoso. Su atenuación es muy baja en el intervalo (630-1600) Hz.

Merece la pena también destacar, en relación con el modelo, que la predicción con distintas geometrías, es diferente y por tanto entendemos que es debido a que están presentes otros factores no contemplados en el modelo.

**RECONOCIMIENTOS**

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación AMB -1029 del Plan Nacional de I + D de la CICYT.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Embleton, "Resisivity of ground surfaces", J.Acoust. Soc. Am. Vol 74, Nº 4, Octubre (1983)
- [2] M.A. Price, K. Attemborough, " Sound attenuation through trees: Measurements and models", J. Acoust. Soc. Am. (1988) 84(5)
- [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.