

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“MÉTODOS DE ENSAYO DE LA RESISTENCIA AL FLUJO DE MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS”

TESIS DE MASTER

Autor:

Fernando Cózar Martínez

Director/es:

D. Jesús Alba Martínez

D Romina del Rey Tormos

GANDIA, 4-09-2013

MÉTODOS DE ENSAYO DE LA RESISTENCIA AL FLUJO DE MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS

Autor: Fernando Cózar Martínez

Director1: Jesús Alba Fernández

Director2: Romina del Rey Tormos

Resumen —

Un parámetro principal que rige el comportamiento acústico de los materiales porosos para la absorción acústica es la resistencia al flujo. La ISO 9053 especifica dos métodos diferentes de medida de la resistencia al flujo, el método con flujo de aire directo (método A) y el método de flujo con aire alterno (método B). Este último, método de flujo con aire alterno, se realiza mediante la medida de la presión sonora a 2Hz en un pequeño volumen rígido y cerrado parcialmente por la muestra de medida. Esta medida requiere instrumentación especial y cuidado. En este trabajo se sugiere un método de flujo de aire alterno basado en la relación de presiones de sonido dentro de dos cavidades acopladas a través de un altavoz convencional. El método que se muestra en este trabajo, demuestra que al diseñar el dispositivo de medida tal que podamos describir matemáticamente su analogía con un sistema electro-mecánico-acústico básico la parte imaginaria de la relación de presión de sonido es útil para la evaluación de la resistencia al flujo de aire. Además, en este trabajo se discuten los criterios sobre la elección de un rango de frecuencias adecuadas de medidas para realizar los cálculos simplificados con respecto al método de la norma.

Abstract —

A main parameter governing the acoustic behaviour of porous materials for sound absorption is the Air flow resistivity. The international ISO 9053 specifies two different methods to measure the air flow resistivity, namely a steady state air flow method (method A) and an alternating air flow method (method B). The latter method air flow is performed by measuring the sound pressure at 2 Hz in a small rigid volume closed partially by the test sample. This cavity is excited with a known volume velocity sound source implemented often with a motor-driven piston oscillating with prescribed area and displacement magnitude. The measurements require special instrumentation and care. This project suggests an alternating air flow method based on the ratio of sound pressures measured inside two cavities coupled through a conventional loudspeaker. The method illustrated in this paper proves that the measuring device that we can describe mathematically as an analogy from an electro-mechanical-acoustic system shows that the imaginary part of the sound pressure ratio is useful for evaluation of resistance to air flow. In addition, this paper discusses the criteria for choosing a suitable frequency range of measures to make the simplified calculations with respect to the standard method.

ÍNDICE

I. Introducción teórica	5
I.1. Métodos predictivos basados en la resistencia al flujo.....	5
I.1.1. Modelo Delany & Bazley.....	5
I.1.2. Modelo Miki	5
I.2. Métodos experimentales ensayo de la resistencia al flujo.....	6
I.2.1. UNE EN 29053:1994	6
I.2.2. Método de Ingard & Dear	10
I.2.3. Método de R. Dragonetti, C. Ianniello, R.A.Romano	12
II. Parte experimental	20
II.1. Construcción del dispositivo de medida de Ingard & Dear	20
II.2. Construcción de nuestro dispositivo de medida.....	21
III. Resultados	22
III.1. Material y procedimiento utilizados en las medidas	22
III.2. Resultados de las medidas.....	24
VI. Conclusiones	28
V. Trabajos futuros	29
Agradecimientos	X
Referencias	Y
Anexos	Z

I. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Los materiales absorbentes están en continuo desarrollo, apareciendo en el mercado nuevas lanas textiles o lanas con base de fibras naturales, materiales distintos a las tradicionales lanas minerales. Todos estos materiales se pueden considerar materiales porosos o materiales fibrosos.

Todos los materiales poseen unos parámetros que los describen. Nos informan de cómo son y cómo se comportan ante ciertas leyes físicas.

En general, la propagación del sonido a través de un material homogéneo e isótropo está determinada por dos valores complejos, la constante de propagación compleja (Γ) y la impedancia característica compleja (Z):

$$Z = \alpha + j\beta \quad (1)$$

$$\Gamma = R + jX$$

En la mayoría de los modelos teóricos el parámetro a partir del cual se obtienen estas dos características de los materiales porosos es la resistividad al flujo (resistencia específica por unidad de espesor) (σ), aunque existen otros modelos que se basan en otros parámetros como el diámetro medio de la fibra, en la tortuosidad o la porosidad [1], en este trabajo nos centraremos en el parámetro de la resistencia al flujo.

La resistencia al flujo, mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor, e , de éste [1]. Valores altos de la resistividad al flujo indican que el material se comportará impermeable al sonido (aislante). Valores de la resistividad al flujo indican que el material absorbente se comportará permeable al sonido. La resistencia al flujo es uno de los parámetros de mayor importancia. La importancia de este parámetro se basa en el hecho que las otras características de los materiales influyen en su valor. Eso hace que se haya utilizado como una variable para los modelos de predicción.

Desde ya hace varios años se investiga en la obtención de modelos que nos ayuden a comprender o intuir el comportamiento acústico de los materiales de forma frecuencial. Obtener algunos parámetros importantes de los materiales absorbentes acústicos, para conocer el comportamiento acústico de éstos.

La diversidad de modelos es amplia, en este capítulo se describen alguno de los métodos predictivos y métodos experimentales para la obtención de la resistencia al flujo.

1.1. *Métodos predictivos basados en la resistencia al flujo.*

1.1.1. *Modelo de Delany & Bazley.*

En este modelo [3], la constante de propagación compleja, Γ , y la impedancia característica compleja, Z , pueden obtenerse de forma teórica mediante las siguientes expresiones.

$$Z = \rho_o c_o \left[1 + 0.0571 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0.087 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{j2\pi}{c_o} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j0.189 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (4)$$

Siendo $j = \sqrt{-1}$

Símbolo	MAGNITUD	Unidades
ρ_o	Densidad del aire	Kg/m ³
F	Frecuencia	Hz
C_o	Velocidad del sonido	m/s
Σ	Resistencia al flujo	Ns/m ⁴

Tabla 1: Magnitudes Físicas relacionadas

Las relaciones 3 y 4, se basan en interpolaciones de medidas en función de f/σ . El rango válido de estas relaciones es el siguiente:

$$10^{-2} \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1 \quad (5)$$

Para los valores fuera de este rango no son aplicables estas expresiones. Las magnitudes se expresan según SI (sistema internacional).

Este modelo es el modelo referenciado actualmente para materiales fibrosos en la norma UNE EN 12354-6:2004 [4]. Los autores se basaron para la obtención de sus valores empíricos en medidas de lanas minerales. Estas lanas eran muy comunes en las edificaciones de los años 70-80, pero poco a poco han ido perdiendo protagonismo, dando paso a otros materiales fibrosos más respetuosos con el medio ambiente. Para muchos de estos nuevos materiales fibrosos, que poco a poco se van abriendo camino en la acústica de la edificación, queda todavía la búsqueda de los parámetros empíricos que los describan.

1.1.2. Modelo de Miki.

En este modelo [5], se obtienen nuevas expresiones basadas en interpolación de valores experimentales de mediciones de espumas:

$$Z = \rho_o c_o \left[1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - j 0.107 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{j 2 \pi}{c_o} \left[1 + 0.160 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} + j \left(1 + 0.109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right) \right] \quad (7)$$

Este modelo también presenta la limitación (Ec. 5), la misma limitación que el modelo anterior (Delany & Bazley). Magnitudes se expresan según SI (sistema internacional).

Siendo $j = \sqrt{-1}$

Símbolo	MAGNITUD	Unidades
ρ_o	Densidad del aire	Kg/m ³
F	Frecuencia	Hz
C_o	Velocidad del sonido	m/s
Σ	Resistencia al flujo	Ns/m ⁴

Tabla 2: Magnitudes Físicas relacionadas

1.2. Métodos experimentales de ensayo de la resistencia al flujo.

1.2.1. UNE EN 29053:1994.

En la Normativa UNE EN 29053 [6], se describen los siguientes parámetros:

Resistencia específica al flujo de aire, R_s :

$$R_s = R \cdot A \quad (8)$$

Siendo:

R , la resistencia al flujo de aire de la probeta en pascales segundo por metro cúbico.

A , el área de la sección de la probeta, en metros cuadrados.

Se expresa en pascales segundos por metro, PaSm.

Resistividad al flujo de aire, r , si el material es homogéneo se define por:

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (9)$$

R_s , la resistencia al flujo de aire de la probeta, en pascales segundo por metro.

d , es el área de la sección de la probeta, en metros, en la dirección del flujo.

Se expresa en pascales segundos por metro, PaSm.

La resistencia específica al flujo, indica la dificultad que opone un material al paso del aire. Este parámetro se obtiene a partir de la impedancia al flujo, que es un valor complejo:

$$Z_f = R_f + jX_f \quad (10)$$

La parte real de este valor es la resistencia al flujo, y es el término dominante de la impedancia.

$$R_f = \frac{\Delta p}{U} \quad (11)$$

La unidad de la resistencia al flujo es Ns/m^3 , o rayl.

La parte imaginaria de la impedancia al flujo es la consecuencia de la masa adicional que aporta la viscosidad de la capa superficial del material, y el movimiento del aire dentro de los materiales porosos del material.

Si se tienen en cuenta el grueso del material (G), se calcula la resistividad al flujo, σ , con:

$$\sigma = \frac{R_f}{G} = \frac{\Delta p}{G \cdot U} \quad (12)$$

Este parámetro se mide en Ns/ms^4 , o rayl/m, y es independiente del grueso del material absorbente.

La parte imaginaria de la impedancia acústica es la reactancia acústica (parte capacitiva o inductiva de la impedancia).

En esta norma, la UNE EN ISO 29053:1994 [6], expone 2 métodos de medida: método con flujo de aire directo (método A) y método con flujo de aire alterno (método B).

En el método con flujo de aire directo (método A), la metodología de medida consiste en pasar un flujo de aire unidireccional controlado a través de una probeta (cilíndrica de base circular o rectangular de base cuadrada) y medir de la pérdida de presión resultante entre las dos caras libres de la probeta (véase la figura 1)

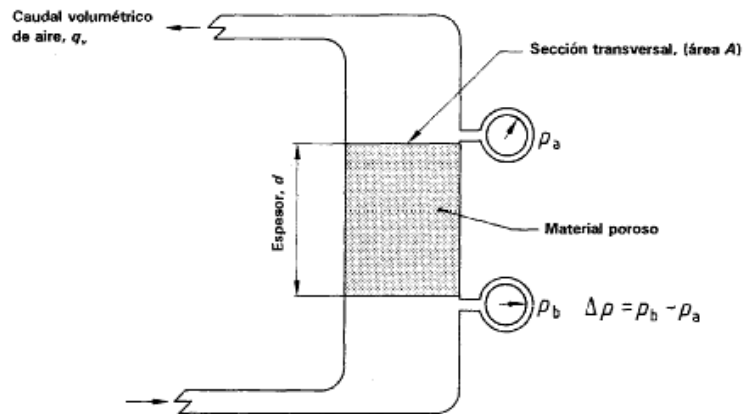


Fig.1. Principio básico del método de medición del flujo de aire directo (método A).

En el método con flujo de aire alterno (método B) [6], la metodología de medida consiste en el paso de un flujo de aire alterno (lento) a través de una probeta (cilíndrica de base circular o rectangular de base cuadrada) y medir la componente alterna de presión en el volumen de ensayo ocupado por la probeta (véase la figura 2)

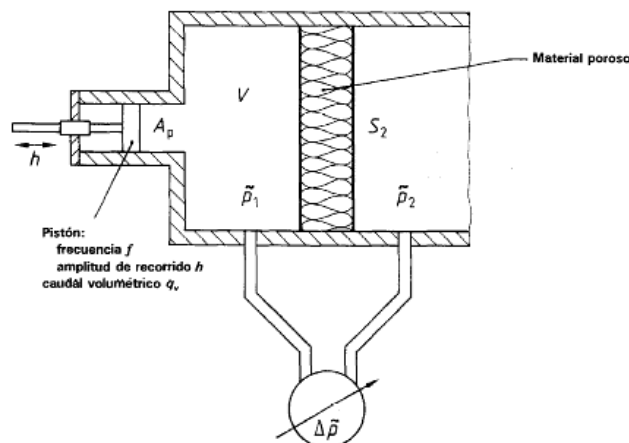


Fig.2. Principio básico del método de medición del flujo de aire alterno (método B).

El esquema necesario para la realización de los ensayos de medida se muestra en la figura 3.

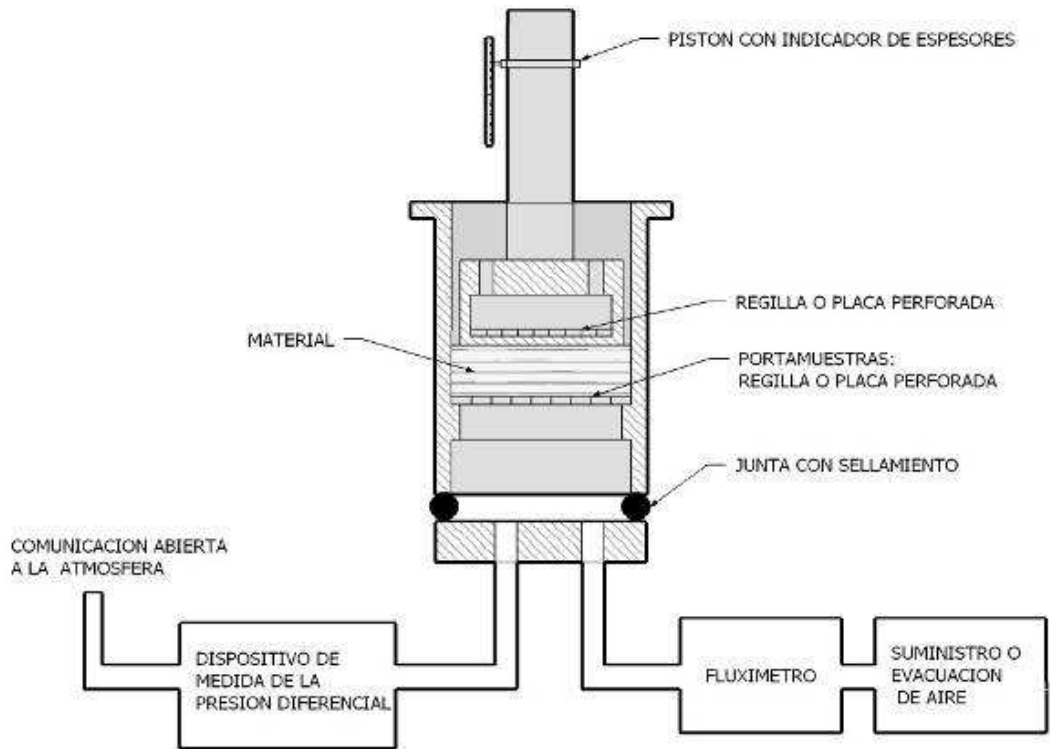


Fig.3. Esquema dispositivo propuesto por la normativa (UNE EN ISO 29053:1994).

En la normativa UNE EN ISO 29053:1994, se definen la resistencia al flujo de aire, R , resistencia específica al flujo de aire, R_s , y la resistencia al flujo del aire, r , con las siguientes expresiones:

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \left[Pa \times \frac{s}{m^3} \right] \quad (13)$$

$$R_s = RA \left[Pa \times \frac{s}{m} \right] \quad (14)$$

$$r = \frac{R_s}{d} \left[Pa \times \frac{s}{m^2} \right] \quad (15)$$

Δp es la diferencia de presión de aire, en pascuales, entre ambos lados de la probeta en relación a la presión a la presión atmosférica, d es el espesor de la probeta. A es el área de la sección de la probeta y q_v es el caudal volumétrico de aire que atraviesa la probeta. La precisión de los valores que se obtienen en este ensayo, según indica la normativa, se están planteando todavía mediante inter comparaciones.

Símbolo	MAGNITUD	Unidades
Δp	Diferencia de presión de aire	Pa

d	Espesor de probeta	m
A	Área de sección de probeta	m^2
qv	Caudal volumétrico de aire	s/m^3

Tabla 3: Magnitudes Físicas relacionadas

1.2.2. Método de Ingard & Dear.

Este método es un método indirecto experimental que permite la obtención de la resistencia específica al flujo para ciertas frecuencias en los materiales absorbentes.

Ingard & Dear [7], diseñaron un método relativamente sencillo para obtener la resistencia específica al flujo. El montaje experimental que proponen Ingard & Dear se puede ver bajo estas líneas (Fig.4).

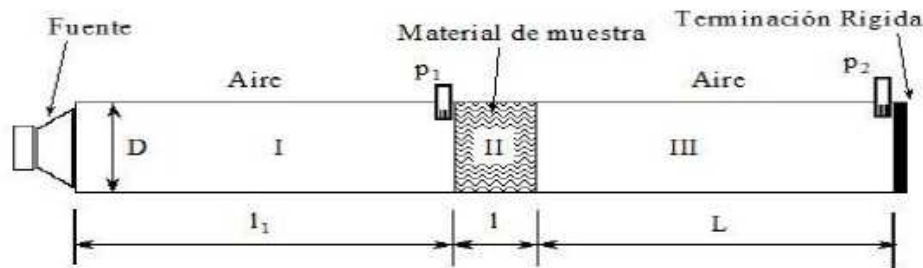


Fig.4 Dispositivo de medida propuesto por Ingard & Dear

Los puntos P1 y P2 son los puntos donde van colocados los micrófono.

El diseño del dispositivo de medida que describen, Ingard & Dear [7], debe cumplir la siguiente condición:

- La sección del tubo debe ser más pequeña que la longitud de onda, λ . Se debe cumplir la siguiente relación, $\lambda \gg 1.7D$ (siendo D, el diámetro del tubo).
- También debe tenerse en cuenta la distancia entre la muestra de material y la terminación rígida, que se elige como $L = (2n-1) \lambda/4$, para $n=1,2,\dots$

La primera condición se debe cumplir para asegurar que la onda incidente del tubo sobre el material absorbente es plana.

Siendo U_1 , la velocidad de la partícula en el punto 1 (cara incidente de la muestra) y P_2 , la presión en el punto 2 (terminación rígida del tubo), se obtiene esta expresión que relaciona la velocidad de partícula en el punto 1 con la presión en el punto 2:

$$U_1 = -i \frac{P_2}{\rho_o c_o} \sin(KL) \quad (1)$$

Donde tenemos que ρ_o , es la densidad del aire, C_o , es la velocidad de la onda en el tubo, L la distancia entre la cara no incidente de la muestra del material y la terminación rígida y k es el número de onda.

En el método de Ingard & Dear, se colocan dos micros en ambos lados de la muestra, como se puede ver en la figura 4.

La expresión que relaciona las expresiones registradas por ambos micrófonos es:

$$P_1' = P_2 \cos(KL) \quad (2)$$

La impedancia al flujo:

$$Z = \frac{P_1 - P_1'}{U_1}$$

A partir de las anteriores expresiones la impedancia al flujo queda de la siguiente forma:

$$Z = i\rho_o c_o \frac{P_1}{P_2} \frac{1}{\sin(KL)} - i\rho_o c_o \cot(KL) \quad (19)$$

La función de transferencia se define como:

$$H_{12} = \frac{P_1}{P_2}$$

Así pues la expresión puede reescribirse como:

$$Z = i\rho_o c_o \frac{P_1}{H_{12}} \frac{1}{\sin(KL)} - i\rho_o c_o \cot(KL) \quad (21)$$

En las frecuencias que se cumple:

$$L = \frac{(2n - 1)\lambda}{4} \cdot n = 1, 2, \dots \quad (22)$$

La parte reactiva de la impedancia al flujo es mucho menor a la parte resistiva, de forma que esta se puede despreciar. De forma que el valor de la resistencia específica al flujo al valor de la impedancia normalizada.

$$\sigma = i \left| \operatorname{Im} \operatorname{ag} \frac{1}{H_{12}} \right| \quad (23)$$

Una vez calculada la resistencia específica al flujo, podemos hallar la impedancia característica y la constante de propagación del material.

1.2.3. Método de R. Dragonetti, C. Ianniello, R. A. Romano.

La norma UNE EN ISO 9053:1994 [6], método estandarizado de medida, presenta algunos inconvenientes, ya que se necesita de instrumentación especial para realizar la medición. En particular el método de medida del flujo de aire alterno (método B) [6], requiere la medición de la presión sonora a una frecuencia de 2Hz en un pequeño volumen rígido cerrado parcialmente por la muestra de ensayo. Esta cavidad se excita con una fuente de sonido de volumen-velocidad conocida (entre 0.5 y 4mm/s). Las mediciones a 2 Hz requieren instrumentación y cuidado especial.

Estas circunstancias y otras consideraciones han estimulado a otros autores a desarrollar una alternativa a este método de medida [6] que supere estos inconvenientes. De forma que su implementación requiera de la instrumentación y herramientas que se supone fácilmente disponible en la mayoría de los laboratorios acústicos.

De esta forma autores como, R. Dragonetti, C Ianniello y R.A Romano [8] desarrollan un dispositivo de medida para obtener la resistencia al flujo de aire distinto a la norma UNE EN ISO 9053:1994 (método B) [6, método B].

El dispositivo de medida que diseñaron, Dragonetti, C Ianniello y R.A Romano [8], para medir la resistencia al flujo de aire, puede verse esquemáticamente bajo estas líneas.

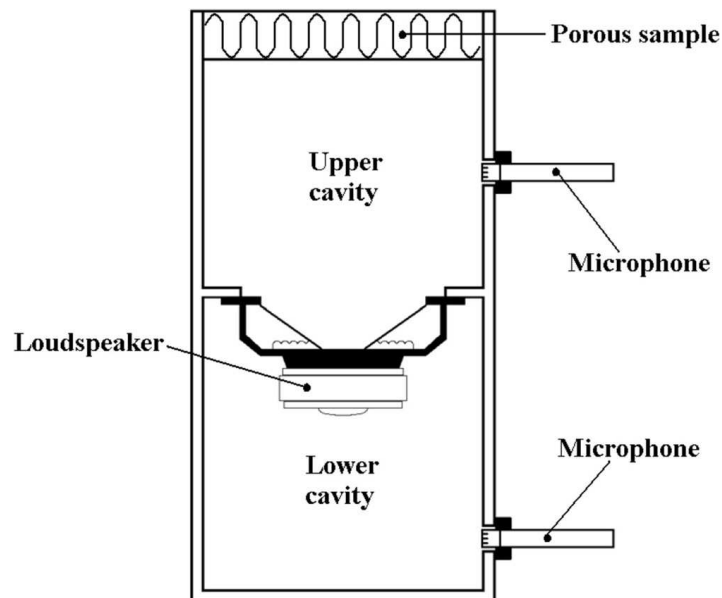


Fig.5. Esquema del núcleo del dispositivo de medida.

Como puede verse en el figura 5, el dispositivo de medida está formado por dos cavidades de sección cuadrada de 10.4 x 10.4 cm, la altura de la cavidad superior es 21.3 cm, la altura de la cavidad inferior es de 9.2 cm (dimensiones interiores).

El dispositivo de medida está diseñado para cumplir los requisitos de la norma ISO EN UNE 9023:1994 [6] que especifica para un soporte de muestras paralelepípedo con una sección transversal cuadrada.

La muestra de material poroso se colocará en la parte superior de la cavidad (parte final). La muestra debe ser como mínimo de 9 cm de lado. Hay que tener en cuenta la rejilla para soportar la muestra. La rejilla debe tener las perforaciones de manera regular en el 50% como mínimo y las perforaciones no deben ser inferiores a 3mm. La altura de la cavidad inferior se eligió lo más pequeño posible compatible con las dimensiones del altavoz.

El dispositivo de medida se ha reproducido en el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia el esquema descrito en [8], basado en la adaptación de la normativa estándar [6], e ilustrado en la figura 5. La altura de la cavidad inferior se eligió lo más pequeña posible compatible con las dimensiones del altavoz.

Las dos cavidades que forman el dispositivo de medida están construidas de plexiglás de 20 mm de espesor. Además nuestro dispositivo de medida se complementará con dos micrófonos de ½ pulgada (uno en cada cavidad) montados a ras y bien sellados (para evitar fugas). También se dispondrá de un altavoz de gama media de 4 pulgadas y un sistema de adquisición de datos.

Para cumplir con la recomendación de la norma ISO 9053 [6] sobre la magnitud de velocidad de flujo de aire, el nivel de presión sonora en las cavidades del dispositivo de medida se controló con el voltaje de alimentación del altavoz, para asegurar una velocidad constante en el valor requerido a cada frecuencia de ensayo.

Como se ha comentado anteriormente, el diseño del dispositivo de medida de Dragonetti, C Ianniello y R.A Romano [8], cumple con todas las especificaciones establecidas en la norma UNE EN ISO 9023 [6].

Este modelo de medida [8], que explica Dragonetti, simplifica mucho la instrumentación necesaria para la medida.

El comportamiento del dispositivo una vez que se conecta, para realizar una medida, es el siguiente:

Al vibrar el altavoz, el desplazamiento de la membrana (en el interior del dispositivo), produce una compresión de aire en una cavidad y al mismo tiempo, se produce una rarefacción en la otra cavidad con el mismo volumen de desplazamiento. Esto implica que las velocidades de volumen impuestas a cada cavidad están en oposición de fase. Debido a la suposición de pequeñez (dimensiones de las cavidades del dispositivo de medida son muy pequeñas con respecto a longitud de onda), la velocidad de volumen desplazado U , en la cavidad inferior y la presión acústica en él están unidos por la siguiente ecuación.

$$U = j\omega C_{dw} P_{dw}$$

Donde P_{dw} es la medida de la presión de sonido complejo dentro de la cavidad inferior, $\omega=2\pi f$ (f es la frecuencia) y C_{dw} es la compliancia acústica del aire en la cavidad inferior.

$$C_{dw} = \frac{V_{dw}}{\gamma P_0}$$

Donde γ es la relación de calor específico (1.41 en el aire), P_0 es la presión atmosférica y V_{dw} es el volumen de aire compresible en la cavidad inferior.

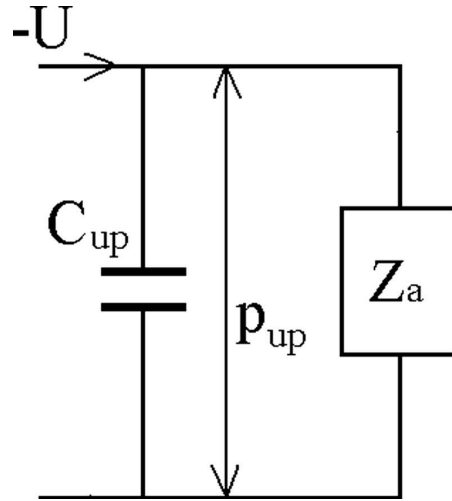


Fig. 6 Circuito eléctrico equivalente de la parte superior del dispositivo de medida de la Fig. 5

En la figura 6, se relaciona la velocidad de volumen y la presión acústica de la cavidad superior, mediante un circuito eléctrico equivalente se realiza una analogía de impedancia.

El aire compresible de la cavidad superior, se deforma con la diferencia entre la velocidad del volumen impuesta por la membrana del altavoz y la velocidad del volumen que entra en la cara inferior de la muestra porosa.

Si se hacen la misma consideración que C_{dw} y completamos con Z_a (impedancia acústica, en función de la capa porosa) y Z_{rad} (impedancia de radiación, capa de material poroso que mira hacia el exterior, aire libre), tenemos la P_{up} (presión sonora compleja de cavidad superior):

$$P_{up} = -U \frac{Z_a/S}{1 + j\omega C_{up} Z_a/S} \quad (26)$$

Combinando las ecuaciones (24) y (26) se obtiene la relación o el ratio de sonido complejo, $r(\omega)$.

$$r(\omega) = \frac{P_{up}}{P_{dw}} = \frac{-j\omega C_{dw} Z_a/S}{j\omega C_{up} Z_a/S + 1} = \frac{-j\bar{C}_{dw} Z_a}{j\omega Z_a \bar{C}_{up} + 1} \quad (27)$$

Donde S es el área frontal de la superficie de la muestra porosa y \bar{C}_{dw} y \bar{C}_{up} son las compliancias acústicas referidas a la misma área frontal S .

Este método requiere el conocimiento del valor de las compliancias acústicas (cavidad superior y cavidad inferior), a su vez esto requiere el conocimiento de sus volúmenes (cavidad superior y cavidad inferior).

Debido a la forma del altavoz montado, los volúmenes de aire deformable en ambas cavidades son difíciles de evaluar con precisión.

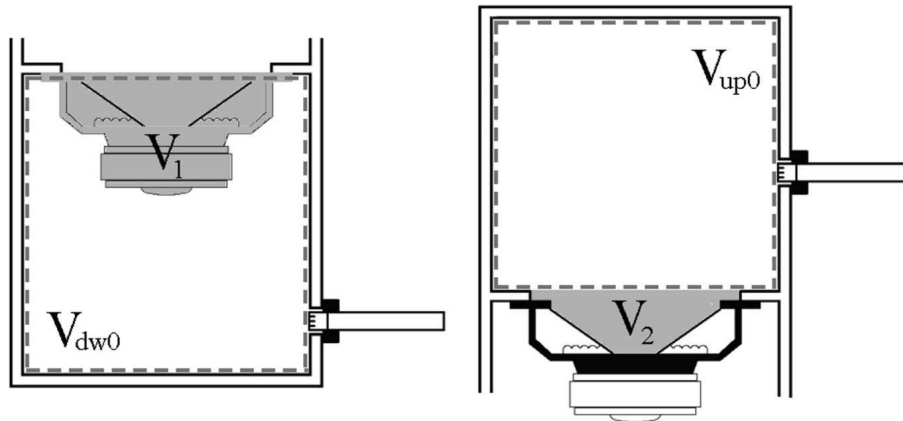


Fig.7. Volumen de las cavidades, sin altavoz (líneas discontinuas), volumen altavoz (zonas grises).

Para poder realizar las mediciones y obtener los datos de la resistencia al flujo es necesario calcular los volúmenes V_1 y V_2 que ocupa el altavoz [8].

Para calcular los volúmenes, se debe cerrar los dos volúmenes V_{up0} y $V_{up0'}$ y se mide r y r' .

El cálculo de los volúmenes lo realizamos con las siguientes expresiones:

$$V_2 = \frac{\left(\frac{r'}{r}\right)V_{up0'} - V_{up}}{1 - \left(\frac{r'}{r}\right)} \quad (2)$$

$$V_1 = V_{dw} + (V_{up0} + V_2)r \quad (2)$$

Símbolo	Magnitud	Unidades
P	Presión sonora	Pa
U	Velocidad de partícula	m/s

Tabla 4: Magnitudes Físicas relacionadas

Los volúmenes deben tenerse en cuenta a la hora de las correcciones.

La impedancia acústica Z_a de una muestra porosa, situada en el dispositivo de medida (Fig. 5), puede ser calculada mediante la ecuación siguiente:

$$Z_a = \frac{Z_c - j Z_{rad} \cot(k_c \cdot d) + Z_c}{\phi \left(Z_{rad} - j Z_c \cot(k_c \cdot d) \right)} \quad (30)$$

Símbolo	Magnitud
Z_c	Impedancia característica material
Z_{rad}	Impedancia radiación material
K_c	Número de onda
ϕ	Porosidad
D	Espesor muestra

Tabla 5: Magnitudes Físicas relacionadas

Para el cálculo de la impedancia de radiación en este trabajo, podemos considerar el dispositivo de medida (Fig. 7) como un tubo con un extremo cerrado y otro abierto. Para el rango de baja frecuencia, considerado en el presente trabajo, la desigualdad $k_0 a < 0,5$ es válido [9], por lo que la impedancia de radiación puede aproximarse a:

$$Z_{rad} = \frac{c}{S} \left(\frac{(k_0 a)^2}{4} + j0.6 k_0 a \right) \quad (31)$$

Símbolo	Magnitud
K_0	Número de onda en el aire
A	Radio equivalente de superficie de extremo abierto
S	Área de muestra de superficie porosa

Tabla 6: Magnitudes Físicas relacionadas

Dada la superficie de la muestra del material poroso y la condición que cumple $k_0 a < 0,5$ [9], se puede desprejarse en la ecuación 30, por lo que la ecuación se puede aproximar a la siguiente ecuación:

$$Z_a \approx jtg(k_c d) Z_c / \phi \quad (32)$$

Si la longitud de onda es lo suficiente mayor que el espesor de la muestra, supuesto de baja frecuencia, $tg(k_c d) \approx k_c d$ y la ecuación 32 puede escribirse como:

$$Z_a \approx j\omega \tilde{\rho} d / \phi = j\omega \tilde{\rho}_{eq} d \quad (33)$$

Si la longitud de onda es lo suficiente mayor que el espesor de la muestra, supuesto de baja frecuencia, $tg(k_c d) \approx k_c d$ y la ecuación 32 puede escribirse como:

Símbolo	Magnitud
$\tilde{\rho}$	Densidad compleja de la fase del fluido
$\tilde{\rho}_{eq}$	Densidad de masa de aire en condiciones estáticas

Tabla 7: Magnitudes Físicas relacionadas

Teniendo en cuenta el modelo de Johnson [11], la ecuación 33 se convierte en:

$$Z_a = j\omega d \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} + \phi d \sqrt{1 + \frac{4j\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 L_v^2 \phi^2}} \quad (34)$$

Símbolo	Magnitud
ϕ	Resistividad del flujo de aire
α_∞	Tortuosidad
ρ_0	Densidad de masa de aire en condiciones estáticas
η	Viscosidad dinámica del aire
L_v	Longitud característica viscosa

Tabla 8: Magnitudes Físicas relacionadas

Según los informes de Allard [12] y el apéndice A [8], el suponer baja frecuencia permite la aproximación de la ecuación 34 como

$$Z_a = \sigma d + j\omega d \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left(1 + \frac{2\alpha_\infty \eta}{\sigma L_v^2 \phi} \right) \quad (35)$$

La ecuación 35, revela que la parte real en la parte derecha de la ecuación, σd , es la resistencia al flujo.

Ingard [7] señaló que la parte imaginaria de una impedancia de flujo como Z_a , es la parte reactiva. Debido a la masa efectiva de inercia del fluido en el material, esto es $\rho_0 \alpha_\infty / \phi$.

Sin embargo, se puede señalar que en la ecuación 35, la masa inercial se incrementa por el término adicional $(2\alpha_\infty \eta / \sigma L_v^2 \phi)$.

La definición de los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
R_a &= \sigma d \\
\sigma_E &= \sigma \phi \\
M_a &= \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \\
\sigma_k &= \frac{2\alpha_\infty \eta}{\sigma L_v^2 \phi} \\
M_k &= M_a \frac{\sigma_k}{\sigma_E}
\end{aligned}$$

Tras la definición de los parámetros, se obtiene una definición más clara de la ecuación 35

$$Z_a = R_a + j\omega d M_a + j\omega d M_k = R_a + j\omega d (M_a + M_k) \quad (41)$$

El término adicional, M_k , se puede considerar una masa adicional que depende de la relación de la resistividad al flujo, σ_k , y a la resistividad eficaz de flujo eficaz, σ_E .

La ecuación 41, confirma que para el límite $f \rightarrow 0$, la parte real de Z_a/d , alcanza el valor de la resistividad del flujo de aire. Esto justifica la necesidad de las mediciones a una frecuencia muy baja.

La combinación de la ecuación 27 con la ecuación 41, se obtiene la siguiente ecuación para la parte imaginaria de la relación de r .

$$\text{im}(r) = \frac{-\omega \bar{C}_{dw} R_a}{1 + (\omega \bar{C}_{up} R_a)^2 + \omega^2 \bar{C}_{up}^2 d^2 (M_a + M_k) \left[\omega^2 (M_a + M_k) - \frac{2}{\bar{C}_{up} d} \right]} \quad (42)$$

Mientras la hipótesis de baja frecuencia se cumple, ecuación 42, podría ser una forma variable para obtener la resistencia al flujo acústico R_a , de una muestra porosa. Sin embargo, además de la información acerca de la disposición geométrica para medición, su cálculo implica también el conocimiento previo de los parámetros M_a , y M_k , definidos en las ecuaciones 38 y 40. En fin de hacer frente a esta complicación, un análisis en profundidad de la ecuación 42 revela que a frecuencias más bajas que f_2 , parte imaginaria de $r(\omega)$, decaen casi linealmente con la frecuencia. Esto puede verse en el apéndice B [8], $f < f_2$, definidas por la ecuación 43.

$$f_2 = \min \left[f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon(\tau_v^2 - 2\tau_M^2) + \sqrt{\varepsilon^2(2\tau_M^2 - \tau_v^2) + 4\tau_M^4}}{2\tau_M^4}}; f_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{|\tau_v^2 - 2\tau_M^2|}} \right] \quad (43)$$

Donde,

$$\tau_v^2 = (\bar{C}_{up} R_a)^2$$

$$\tau_M^2 = \bar{C}_{up} d (M_a + M_k) \quad (4)$$

Se pueden considerar dos tiempos al cuadrado que dependen de la resistencia al flujo, τ_v^2 (tiempo viscoso) y la densidad de masa, τ_M^2 (tiempo inercial). Se puede observar que cuanto más pequeña es la diferencia de los valores al cuadrado, τ_v^2 y τ_M^2 , más grande será la frecuencia f_2 .

La ecuación 42, finalmente puede aproximarse a:

$$im(r) = -\omega \bar{C}_{dw} R_a \quad (4)$$

Además hay que comentar que el error relativo en relación con la sustitución de la ecuación 34 con la ecuación 35, [8] apéndice A, se puede reducir el valor del error en un rango de frecuencias con el límite de frecuencia superior, f_1 .

$$f_1 = \frac{\sigma_E^2 \phi}{4\pi\sigma_k M_A} \text{tg}(2\vartheta) \quad (4)$$

Donde $\vartheta=0.1408$ si $\varepsilon=0.01$ y $\vartheta=0.0447$ si $\varepsilon=0.001$.

El valor más pequeño entre f_1 y f_2 , define la frecuencia f_{lim} , que es el límite superior del rango de frecuencias donde el valor aproximado de los errores, ε , es el más pequeño.

II. PARTE EXPERIMENTAL.

En este trabajo se busca como objetivo principal el estudio de los resultados obtenidos mediante el método de Dragonetti et al. (2010) [8], testeando así el equipo de medida diseñado en el propio laboratorio, participando así en la calibración de este dispositivo. Para ello, se comparan con los valores obtenidos por el método de Ingard & Dear (1985) [7], de la medida de la resistencia al flujo para materiales absorbentes porosos.

Los dos métodos de medida utilizados en este trabajo, tienen la similitud al utilizar un altavoz y dos micrófonos para la obtención de las medidas. En el siguiente punto se describen ambos métodos, con los dispositivos propios de medida, diseñados en el propio laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

II.1. Construcción del dispositivo de medida de Ingard & Dear.

El dispositivo de medición descrito por Ingard & Dear (1985) fue diseñado y construido por (Ramis et al., 2010)[13].

El dispositivo de medida consiste es un tubo cilíndrico de polimetilmetacrilato (PMMA) de un espesor en sus paredes de 5mm y 169cm de longitud. Un extremo del tubo está equipado con un altavoz de alta frecuencia (Beyma CP800TI) con un diámetro de garganta de 49mm, lo que permite una emisión sin distorsión considerable a 100Hz. El otro extremo del tubo se cierra con

una terminación rígida, terminación de sonido altamente reflexivo. Los dos micrófonos usados son de 1/2" y son montados a ras dentro de las paredes del tubo.

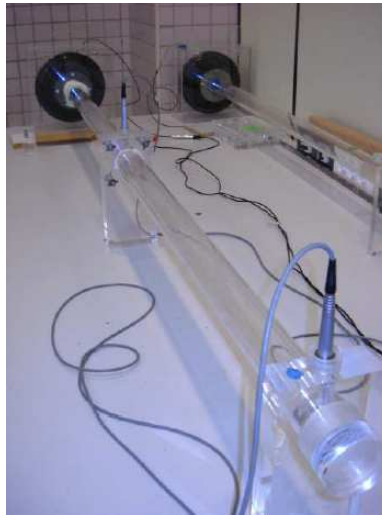


Fig.8. Foto del dispositivo de medida Ingard & Dear.

II.2. Construcción de nuestro dispositivo de medida.

Este dispositivo está diseñado y construido con el objetivo de obtener la medida de la resistencia al flujo de materiales absorbentes porosos, se ha utilizado el dispositivo propuesto por Dragonetti et al. (2010) [8] que está adaptado a las condiciones que marca la norma ISO[6].

El dispositivo descrito en la referencia, así como el dispositivo diseñado para este estudio están contruidos con polimetilmetacrilato (PMMA) con un espesor de 20mm. El volumen de las cavidades superior es de 2.30 litros, la cavidad inferior del dispositivo es de 0.99 litros. El dispositivo está compuesto por una rejilla perforada, donde se coloca la muestra de estudio.

El diseño de la rejilla considera perforaciones circulares de 8,5mm de diámetro, con separaciones de 10,4mm tanto en el eje horizontal y vertical. Con esto, el área perforada del soporte de la muestra es de 64,7%. Es necesario, en línea con el prototipo de referencia, para tener al menos 50% de la superficie perforada, con un diámetro de perforación de al menos 3mm.

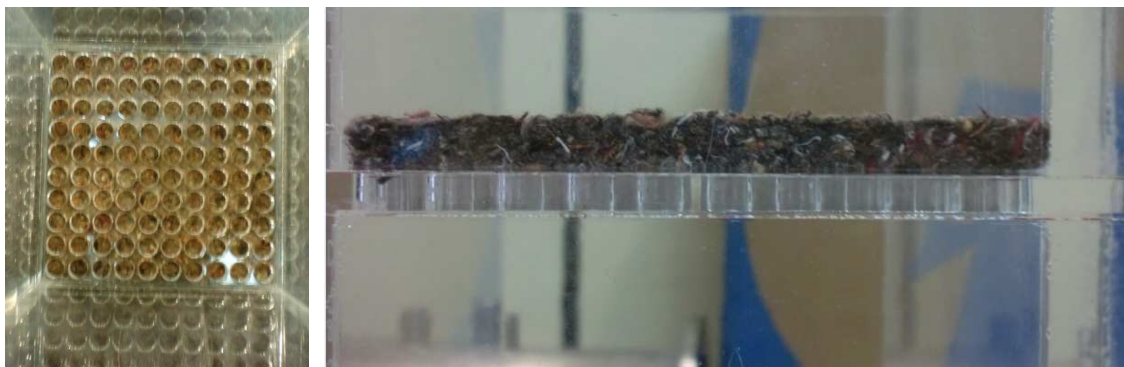


Fig.9. Foto de la rejilla y material ensayado en el dispositivo de medida Dragonetti, C. Ianniello, R.A. Romano, et al. (2010)

Cabe destacar que el método propuesto por Dragonetti et al. (2010) se basa en la adaptación de la norma (ISO, 1991) [6] en particular el método B, que se basa en la medida de la resistencia al flujo de manera alterna.



Fig.10. Foto del dispositivo de medida Dragonetti, C. Ianniello, R.A. Romano, et al. (2010)

Los micrófonos en ambos casos son de $\frac{1}{2}$ " y el diámetro del altavoz utilizado (Fonestar UT-354) es de 3 pulgadas. Este altavoz tiene una buena respuesta en el rango de frecuencias utilizadas en el estudio.

III. RESULTADOS.

Este apartado de resultados presenta dos puntos, un primer punto en el que se explicará el procedimiento así como el material utilizado para la realización de cada una de las medidas de este estudio. En el segundo punto de este apartado se presentarán tablas y gráficas dónde se podrán observar los datos obtenidos.

III.1. *Material y procedimiento utilizados en las medidas.*

En la realización de este trabajo se ha utilizado materiales reciclados textiles[13], materiales absorbentes porosos. En este estudio se han evaluado 12 muestras de material absorbente poroso, cada muestra de material estudiado presenta diferencias físicas en densidad y espesor.

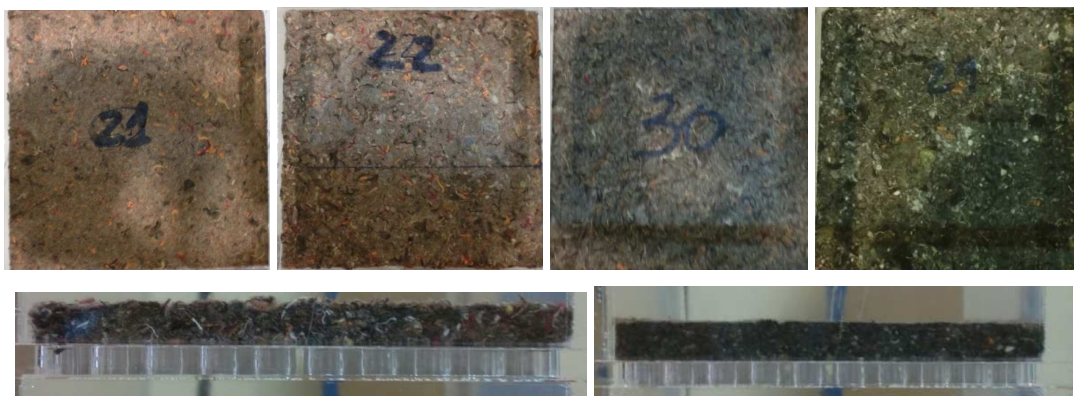


Fig.11. Foto de algunas de las muestras ensayadas.

Para la realización de las medidas de este trabajo, se han utilizado los siguientes recursos, todos disponibles en el laboratorio de materiales (B015) de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia:

- Dispositivo de medida (detallado en el punto II.1 y II.2 Construcción de nuestro dispositivo de medida).
- Materiales absorbentes porosos, ajustadas a las dimensiones del dispositivo de medida.
- Plataforma de obtención de datos Pulse.
- Amplificador.
- Cableado.
- Calibrador.
- Micrófonos de ½" pulgada.
- Ordenador.

Para los resultados de los ensayos obtenidos en este trabajo se han tenido en cuenta algunos detalles y procedimientos para realizar las medidas, estos se explican bajo estas líneas:

- Conectar los equipos (PC, amplificador, PULSE) y cargar las plantillas en PULSE.
- Calibrar micrófonos.
- Se debe de comprobar durante el montaje cuidar la colocación de las muestras colocadas en el dispositivo de medida.
- Para cada medición se deben utilizar como mínimo dos muestras diferentes de cada material que se desee ensayar o un número mayor (en este trabajo se han realizado las medidas con tres muestras diferentes del mismo material para tener menor probabilidad de error).
- Todos los ensayos deben realizarse bajo las mismas condiciones.
- Otro punto importante a tener en cuenta la hora de realizar las medidas es la corrección por desajuste entre los dos micrófonos (corrección de fase), el cual se debe tener en cuenta durante todo el ensayo. Esto consiste en hacer el intercambio de los canales para cada medida, es decir, para cada muestra se realizan 2 medidas, una con los dos micrófonos en una posición y otra intercambiándolos. Así se obtiene la función de transferencia H_{12} y H_{21} de cada medida realizada (no se debe desconectar ni preamplificador ni analizador de señal, ni ningún otro dispositivo para realizar la medida intercambiando los micrófonos).



Figura 12. Imagen de laboratorio e instrumental de medida.

III.2. Resultados de las medidas.

Una vez realizadas todas las medidas para cada muestra se pueden ver los resultados obtenidos en la tabla 9. Los valores de la resistencia al flujo obtenidos ensayados mediante el procedimiento que hemos descrito anteriormente para el método Ingard & Dear [7] y Dragonetti [8].

Materia l	Espesor (mm)	Densida d (Kg/m ³)	Resistencia al flujo Dragonetti (KPas/m ²)	Error (+/-)	Resistencia al flujo Ingard & Dear (KPas/m ²)	Error (+/-)
M 21	0.8	0.642	13.7	0.29	49.2	2.0
M 22	0.8	0.582	28.2	0.47	46.8	5.6
M 23	1.3	0.619	7.38	0.69	24.1	7.9
M 24	0.8	0.598	29.35	0.44	44.7	3.3
M 25	0.7	0.540	35.1	0.86	57.8	2.5
M 26	1	0.571	17.1	0.75	25.2	3.8
M 27	1.5	0.466	5.7	2.1	27.4	0.6
M 28	1.35	0.552	6.8	1.2	28.6	1.9
M 29	0.35	0.583	170.4	3.5	101.1	5.2
M 30	0.45	0.458	21.35	3.3	117.9	5.7
M 31	0.85	0.441	39.4	1.20	56.3	4.4
M 32	0.9	0.399	59.1	1.18	44.6	2.7
M33	1.65	0.462	8.12	0.952	22.4	0.8

Tabla 9: Resultados del ensayo

En la tabla 9, podemos observar las 7 columnas (Material, Espesor, Densidad, Resistencia al flujo, Error, Ingard & Dear, Error).

Los errores que aparecen en la tabla 9, son valores estadísticos, esto es, se han realizado al menos 3 mediciones distintas de cada material y se ha obtenido la dispersión de las medidas.

En la figura 13 se puede ver gráficamente el valor de los resultados que se muestra en la tabla 9.

Los valores obtenidos de cada material, en la tabla 9, se han obtenidos para unas determinadas frecuencia de validez (Frec.1 y Frec.2). Como se ha descrito en apartados anteriores, mientras el valor de la parte imag(r) frente la frecuencia sea plano estaremos trabajando bajo frecuencias de validez de este modelo, Dragonetti[8].

Materia l	Frec. 1 (Hz)	Frec. 2 (Hz)	Resistencia al flujo	Error (+/-)	Resistencia al flujo	Error (+/-)
--------------	-----------------	-----------------	-------------------------	-----------------	-------------------------	-----------------

	Dragonetti (KPa s/m^2)				Ingard & Dear (KPa s/m^2)		
M 21	298	360	13.7	0.29	49.2	2.0	
M 22	235	275	28.2	0.47	46.8	5.6	
M 23	301	401	7.38	0.69	24.1	7.9	
M 24	230	277	29.35	0.44	44.7	3.3	
M 25	230	300	35.1	0.86	57.8	2.5	
M 26	283	275	17.1	0.75	25.2	3.8	
M 27	349	485	5.7	2.1	27.4	0.6	
M 28	345	456	6.8	1.2	28.6	1.9	
M 29	129	164	170.4	3.5	101.1	5.2	
M 30	122	147	21.35	3.3	117.9	5.7	
M 31	184	250	39.4	1.20	56.3	4.4	
M 32	183	219	59.1	1.18	44.6	2.7	
M33	220	314	8.12	0.952	22.4	0.8	

Tabla 10: Resultados de resistencia al flujo y sus frecuencias de validez

Bajo estas líneas se puede ver una gráfica con el valor de la parte $\text{imag}(r)$, con respecto de la frecuencia. De la gráfica de la figura 13 se puede sacar para cada material su frecuencia de validez para obtener el valor de resistencia al flujo para el método de Dragonetti [8].

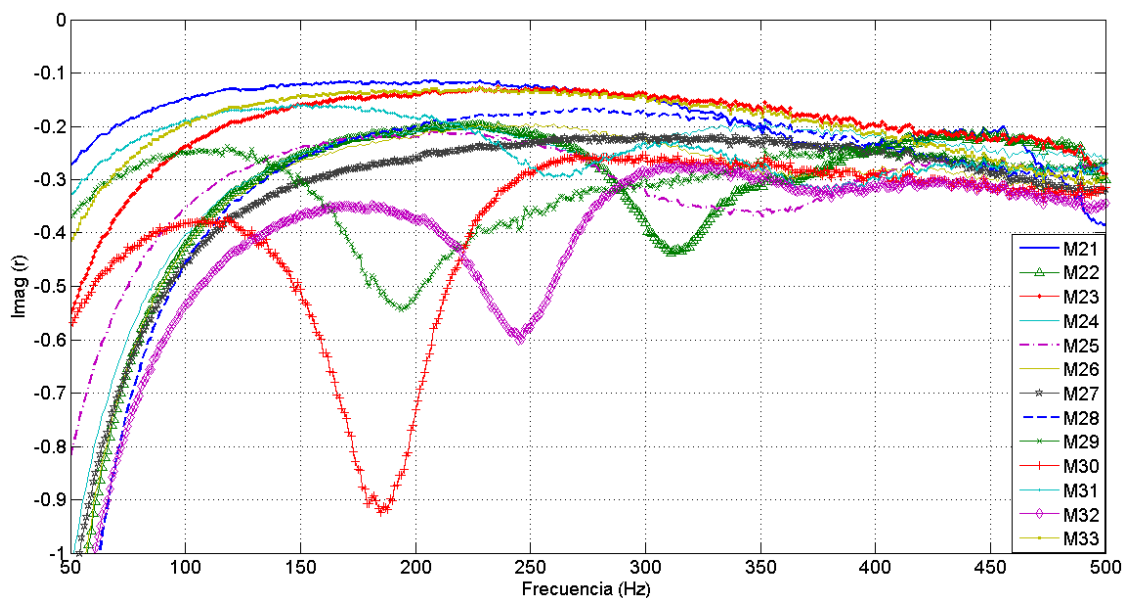


Fig. 13: Gráfica de parte $\text{Imag}(r)$ (Dragonetti) respecto de frecuencia de todos los materiales estudiados.

Tras ver los resultados obtenidos de los valores de la resistencia al flujo, en la tabla 9, para el método Ingard & Dear [7] y Dragonetti [8], se puede observar que los resultados obtenidos de la resistencia al flujo por ambos métodos dan resultados diferentes. Algunos de los materiales presentan valores de resistencia al flujo muy altos (material impermeable al sonido). Bajo estas

líneas se realiza un gráfico, figura 14, con el valor de la resistencia al flujo de cada material testeado.

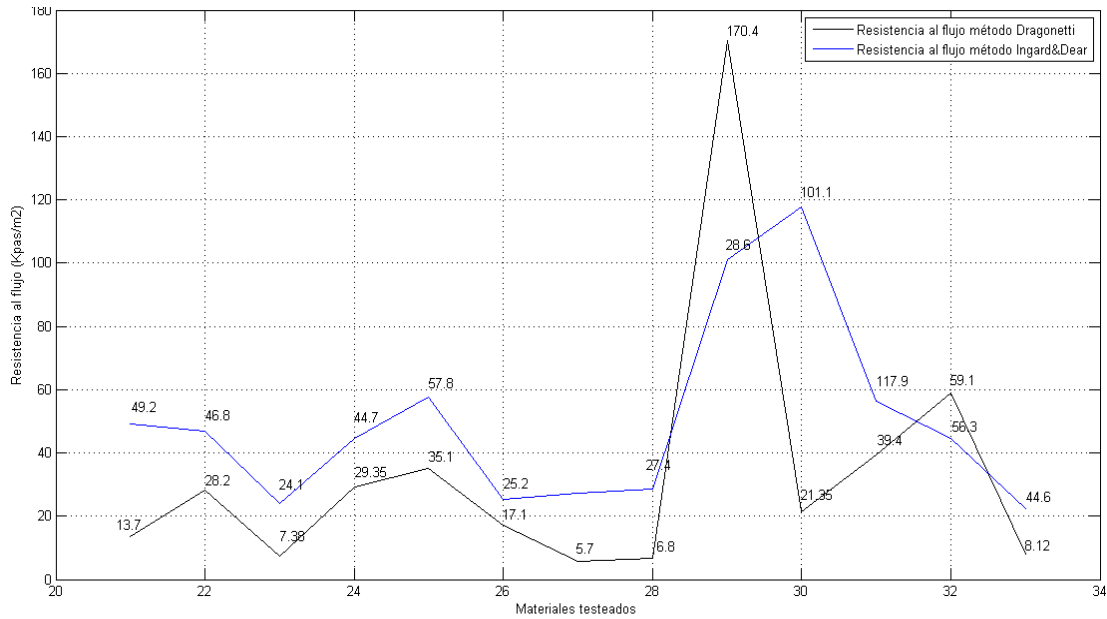


Fig. 14: Gráfica del valor de resistencia al flujo para cada material estudiado. Valores de la tabla 9.

Bajo estas líneas podemos observar el mismo gráfico que el representado en la figura 16, pero ahora mediante un gráfico de barras.

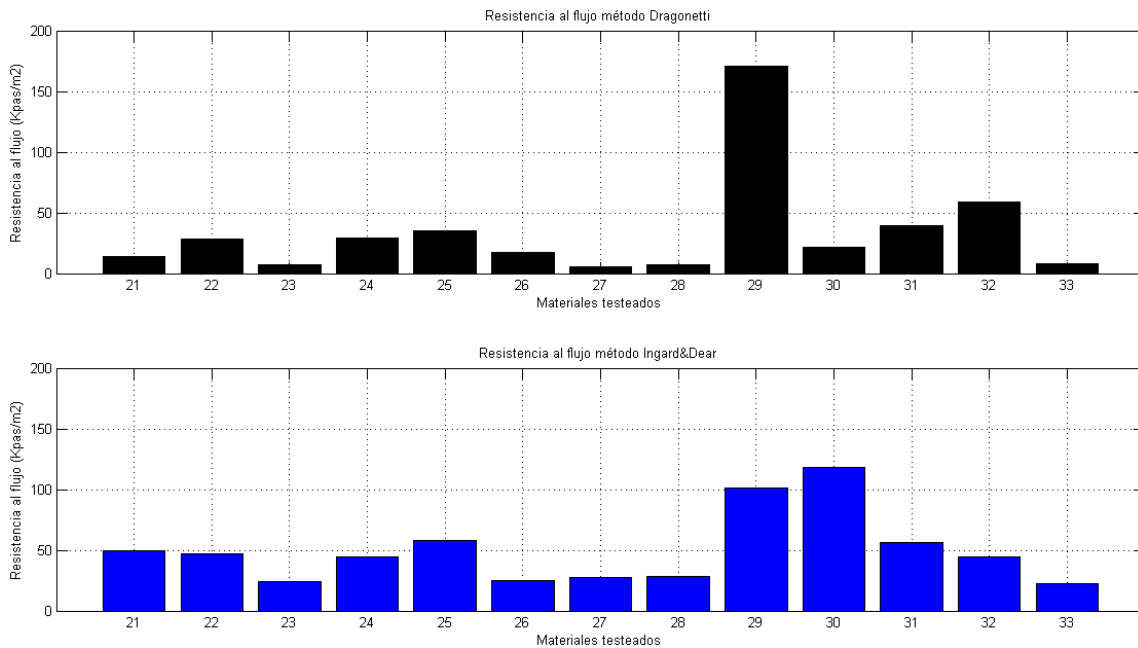


Figura 15. Valor de la resistencia al flujo para cada material calculado para los dos métodos.

Tras observar los resultados de ambas gráficas (figura 14 y figura 15), se puede ver cierta similitud en los dos métodos estudiados, ya que aunque los valores de la resistencia al flujo son distintos entre los dos métodos (como se puede observar en la tabla 9), las gráficas nos indican cierta similitud entre ambos métodos, ya que si se analizan detenidamente se puede ver un comportamiento de paralelismo entre los resultados obtenidos en ambos métodos para los materiales 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 33. Se puede observar con mejor claridad en la figura 16 (figura 16 tras eliminar los materiales que presentan mayor dispersión 22, 29, 30, 31, 32).

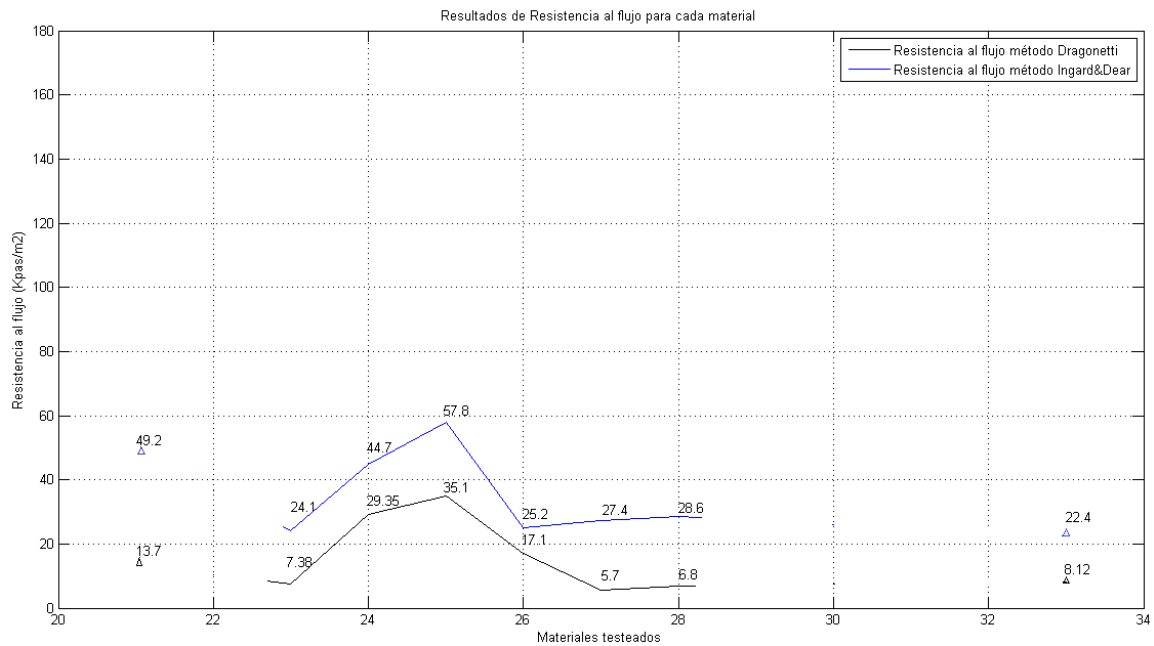


Fig. 16: Gráfica del valor de resistencia al flujo para los materiales 21,23, 24, 25, 26, 27, 28, 33.

También podemos observar la gráfica de la figura 17, tras eliminar los materiales 22, 29, 30, 31, 32.

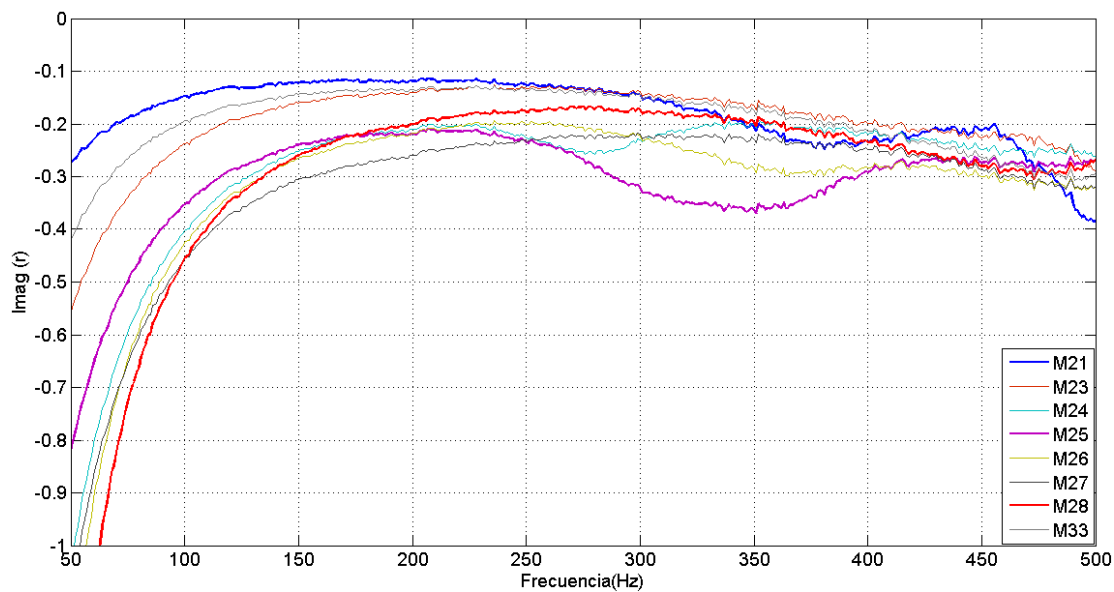


Fig. 17: Gráfica de parte Imag(r)(Dragonetti), respecto de la frecuencia para los materiales 21,22,23,24,25,26,27,28,33.

Tras analizar las gráficas de la figuras 16 y 17, se puede decir que aunque en la figura 16 se puede ver cierta similitud gráficamente (no en resultados) entre los datos de la resistencia al flujo de ambos métodos, en la figura 17 se puede percibir claramente que todavía existen materiales que no siguen la tendencia de Dragonetti[8].

Tras eliminar los materiales 21, 24, 25, 26 podemos ver la siguiente figura:

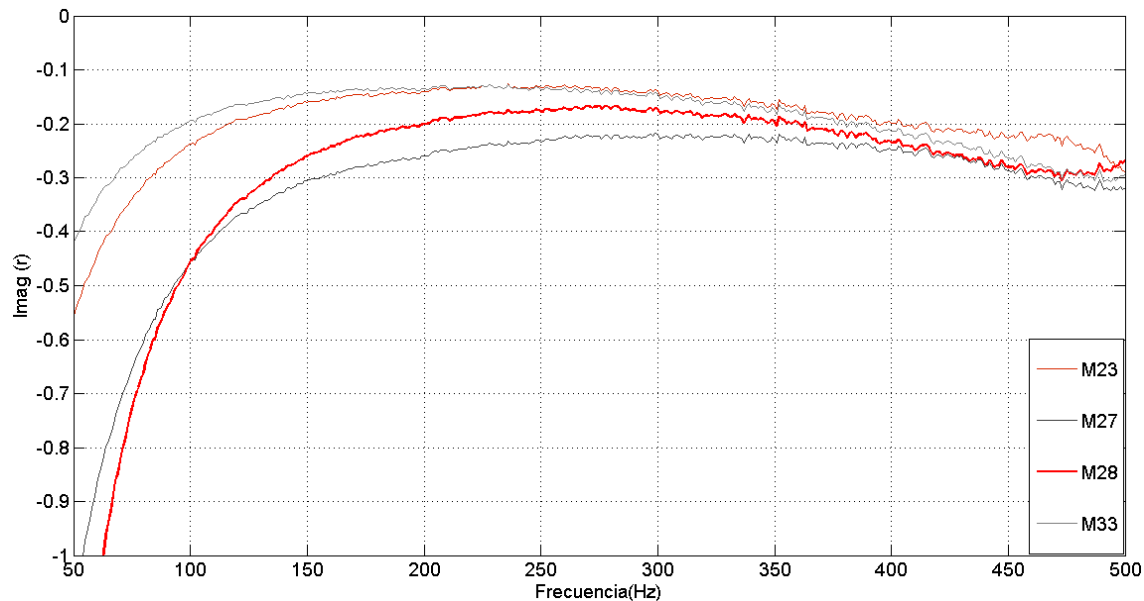


Fig. 18: Gráfica de parte Imag(r), (Dragonetti) respecto de la frecuencia para los materiales 23, 27, 28, 33.

Parece que tras estudiar la figura 18, se puede ver que los resultados de dicha gráfica siguen la tendencia de Dragonetti [8] para un mayor rango de frecuencias (la parte Imag (r) es plana).

IV. CONCLUSIONES.

A lo largo de este trabajo, se ha visto y estudiado un método de ensayo para la obtención de la resistencia al flujo en materiales absorbentes acústicos. La validez de este método estudiado se comenta en este apartado de conclusiones.

Este trabajo ha sido una tarea claramente experimental, siendo grande la cantidad de materiales estudiados en el laboratorio (materiales absorbentes de tipo poroso). También cabe destacar que para el estudio que se ha llevado a cabo en este proyecto, ha sido necesario el desarrollo de un dispositivo de medida, dispositivo en el cuál se han desarrollado todas las medidas. El dispositivo se ha diseñado según los estudios de Dragonetti [8] y la Norma UNE EN ISO 29053:1991 [6].

La validación o no del método de medida estudiado en este trabajo, se realiza mediante la intercomparación de los datos obtenidos de la resistencia al flujo mediante el método de Dragonetti [8] y el método de Ingard & Dear [7].

Como ya se ha comentado en el apartado de resultados, los valores obtenidos para la resistencia al flujo mediante los métodos de Dragonetti [8] e Ingard & Dear [7] presentan diferencias. Pero si se observa la representación gráfica de los valores obtenidos en cada método para cada material, que los valores presentan una misma tendencia, se observa cierto paralelismo entre los valores.

Por lo cual, en la actualidad, a falta de una calibración mucho más detallada de este nuevo dispositivo de medida, podemos afirmar que nos sirve para poder conocer valores relativos de la resistencia al flujo, y poder comparar entre distintos materiales, cuál presenta propiedades de mayor/menor impermeabilidad al sonido. Tras estudiar los resultados obtenidos, se ha podido

observar, que incluso dentro de una misma familia de materiales, en este caso, reciclados del textil, el dispositivo presenta valores con distintos errores de medida para distintos materiales. No parece existir relación entre la precisión del dispositivo y magnitudes macroscópicas como densidad, espesor, etc. Por lo tanto, deberíamos estudiar con detalle otras propiedades de los materiales, como tortuosidad, porosidad o diámetro de los poros o fibras.

V. TRABAJOS FUTUROS.

Tras presentar los resultados y conclusiones de este trabajo en los puntos anteriores quedan abiertas muchas líneas de trabajo. Algunas de ellas se describen a continuación:

- Elección de una nueva base de datos de materiales absorbentes para ampliar la calibración de este dispositivo de medida. Con este trabajo, hemos comprobado la dependencia de la precisión del mismo con la naturaleza del material estudiado. Los nuevos materiales elegidos para el estudio deberían tener, a ser posible, una base no reciclada, y poder así tener controlados parámetros de diámetro de fibras y/o poros u otras magnitudes.
- Realizar un estudio detallado del error de las medidas. En este trabajo hemos considerado solamente el error estadístico, dando mayor importancia a los rangos de frecuencias válidos según el método base. Se pone de manifiesto el estudio detallado del error asociado al propio modelo simplificado.

REFERENCIAS

- [1] J. Alba, Romina del Rey, apuntes de Aislamiento acústico, Master de Ingeniería acústica (EPSCG), (2010-2011).
- [2] J. Alba, J. Ramis, M^a Teresa L., R. Del Rey. Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos. Revista Internacional de Métodos numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, (2008),147-162.
- [3] Delany M.E. Bazley E.N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics 3 (1970), 105-116.
- [4] UNE EN 12354-6:2004. Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 6: Absorción sonora en espacios cerrados.
- [5] Miki Y. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Modifications of Delany&Bazley models" J. Acoust. Soc. Jpn (E) 11, 1 (1990) 19-24.
- [6] UNE EN ISO 29053:1991, Determinación de la resistencia al flujo de aire.
- [7] Ingard K. U., Dear T. A. Measurement of acoustic flow resistance. J. Sound Vib. 103(4), (185) 567-572.
- [8] R. Dragonetti, C. Ianniello, R. A. Romano. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method (2011), Journal of the Acoustical Society of America, 129, 2, 753-764.
- [9] M. L. Munjal, Acoustics of Ducts and Muffler (Wiley-Interscience, New York, 1987), pp. 47-49.
- [10] C. Zwikker and C. W. Kosten, Sound Absorbing Materials (Elsevier, London, 1949), pp. 2-4.
- [11] D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", J. Fluid Mech. 176, 379-402, (1987).
- [12] J. F. Allard, Propagation of Sound in Porous Media Model ling. Sound Absorbing Materials (Elsevier, London, Uk, 1993), pp. 1-284.
- [13] J. Ramis, J. Alba, R. Del Rey, E. Escuder, V. J. Sanchís. Nuevos materiales absorbentes acústicos basados en fibra de Kenaf (New absorbent material acoustic base don kenaf's fibre). (2010).