

ðððððð

- Resumen 2
- Introducción 3
- Estudio teórico
- Información general sobre ondas 4
- Características físicas de las ondas 4
- Reflexión, refracción y difracción 5
- El sonido 6
- Cualidades físicas del sonido 6
- Reflexión y refracción 8
- Eco y reverberación 9
- Absorción del sonido en el medio físico 11
- Absorbentes sonoros 12
- Estudio experimental 15
- Análisis de resultados y conclusión 32

– Bibliografía 33

ðð ðððððððð

En este trabajo estudio las relaciones de los materiales y su capacidad para absorber ondas sonoras.

La hipótesis que planteo, previa al estudio teórico y experimental, es que la absorción dependerá de la porosidad del material y de su espesor, aunque, por supuesto, no sean los únicos factores con los que se modifica.

Previo al estudio experimental, he llevado a cabo un estudio teórico, para aprender los fundamentos teóricos necesarios en los que se basan mis experiencias.

Para argumentar la hipótesis, adjunto los resultados de los estudios realizados en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), que consistieron en introducir en la cámara reverberante muestras de diferentes materiales, emitir un sonido a través de unos altavoces, y captar con un micrófono el tiempo que tardaba dicho sonido en reducirse 60 dB. Ese tiempo es el tiempo de reverberación, con el que después se puede calcular la capacidad de absorción de dicho material.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la porosidad, la rigidez y el espesor son magnitudes determinantes en la capacidad de absorción de ondas sonoras.

ðð ðððððððððððððð

Al estudiar el tema de ondas, descubrí que podía investigar sobre una gran afición, me gusta tocar el piano, y la música en general, y elegí un aspecto original para estudiar: la absorción acústica. He enfocado el trabajo más hacia los materiales de construcción porque es la aplicación más corriente de dicha cualidad, y porque me gustaría estudiar arquitectura.

La pregunta que planteo en mi trabajo es la siguiente: ¿de qué factores depende el grado de absorción de ondas sonoras de diferentes materiales? Para intentar contestar a esta pregunta, primero daré unas nociones básicas sobre ondas en general, para pasar luego a las ondas acústicas y aportó un estudio experimental realizado en el CSIC (consejo superior de investigaciones científicas). Desde aquí doy las gracias a D.

Francisco Simón Hidalgo, por su apoyo en todo momento, y la cantidad de horas que me ha dedicado durante el tiempo que he pasado en su centro, estudiando la absorción en los diferentes materiales.

Me gustaría también agradecerle a Sara Varela, estudiante de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad en Imagen y Sonido, la cantidad de información que me ha facilitado para la realización de este trabajo.

¿Qué es una onda?

Definición de onda

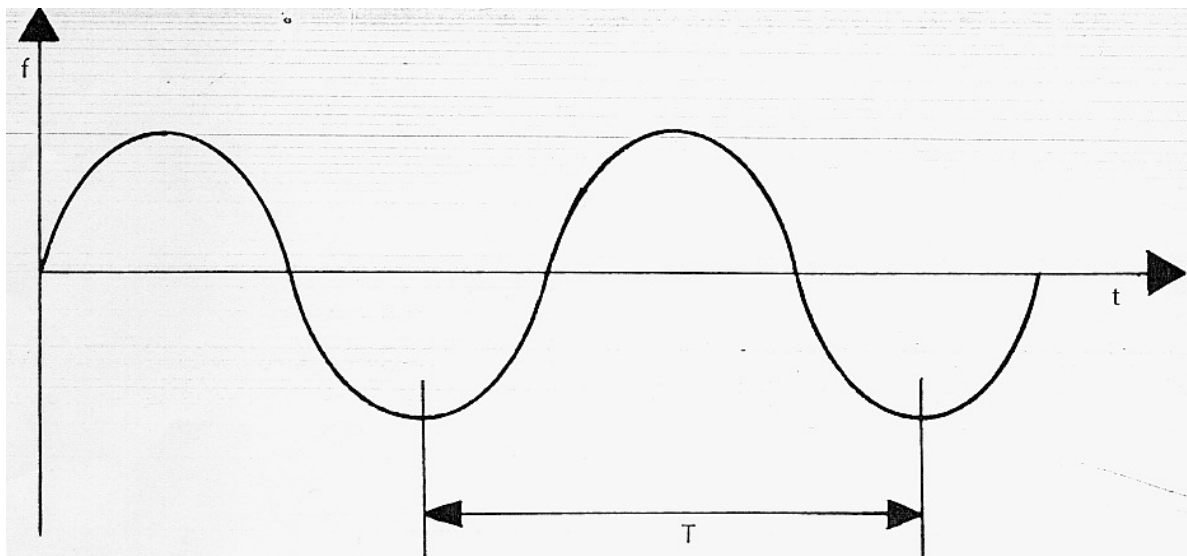
Las ondas son una perturbación periódica del medio en que se mueven. Transportan energía sin transportar materia.

Por su carácter se clasifican en *mecánicas*, que necesitan un medio material para poder propagarse, y *electromagnéticas*, que no necesitan de ese medio, ya que las oscilaciones corresponden a variaciones en la intensidad de campos magnéticos y eléctricos. Las electromagnéticas se escapan del alcance de este trabajo, hablaré solo de las mecánicas. Estas pueden ser *longitudinales* (el medio se desplaza en la dirección de propagación), o *transversales* (el medio se desplaza en dirección perpendicular a la dirección de propagación.)

Una propiedad general de las ondas es que su velocidad depende de las propiedades del medio, y es independiente del movimiento de la fuente de las ondas. En una cuerda es fácil demostrar que cuanto mayor es la tensión y más ligera es la cuerda, más rápidamente se propagan las ondas.

¿Qué es una onda armónica?

Si un extremo de una cuerda se sujeta a un diapasón se produce una onda sinusoidal que se propaga a lo largo de la cuerda. Es una onda armónica:



Dibujo de una onda armónica

La distancia entre dos crestas es la longitud de onda λ , medida en metros. La frecuencia f es el número de oscilaciones producidas en un segundo, y se mide en Hz (hercios). El periodo T es el tiempo que tarda una partícula en realizar la oscilación completa, es la inversa de la frecuencia, y se mide en segundos. Hay una ecuación que relaciona la velocidad de propagación, la longitud de onda y la frecuencia:

$$v = \frac{\lambda}{T} = f \lambda$$

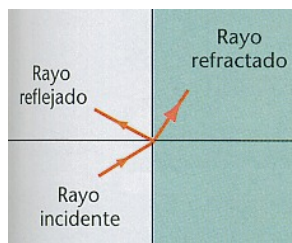
El desplazamiento máximo respecto a la posición de equilibrio es la amplitud A . La función sinusoidal que describe el desplazamiento de la onda es:

$$y = A \sin(\omega t - kx)$$

donde k es el número de ondas, x la distancia del punto al origen, ω la frecuencia angular y t el tiempo.

ððððð ðððððððððð, ðððððððððð ð ððððððððððð

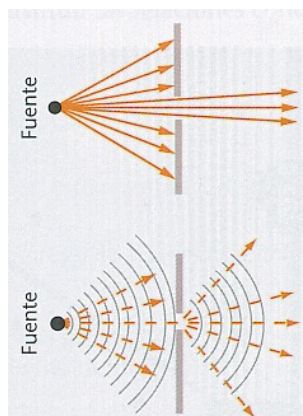
Cuando una onda tridimensional incide sobre una superficie de separación de dos regiones de densidad diferente, parte de la onda se refleja y parte se transmite, aunque con ciertos cambios. El rayo reflejado forma un ángulo con la normal a la superficie igual al que forma el rayo incidente. Esto es la reflexión.

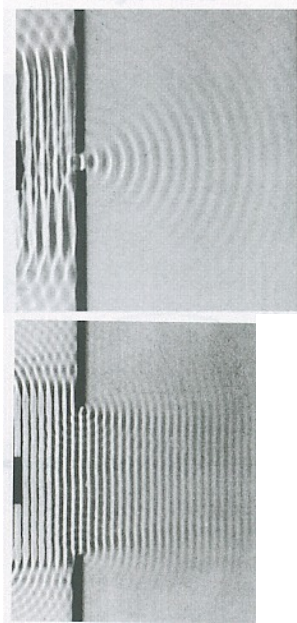


Reflexión y refracción

El rayo transmitido se acerca o aleja de la normal dependiendo de si la densidad del segundo medio es mayor o menor. Este fenómeno es la refracción.

Las ondas son capaces de traspasar orificios y bordear obstáculos. Si encuentra una barrera con una pequeña abertura, la onda se incurva y se extiende a su través en forma esférica o circular, funcionando la abertura como un nuevo foco de la misma onda. Es la difracción. La magnitud de este fenómeno depende de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la abertura.





La difracción Depende de la relación entre el tamaño de la abertura y λ .

¿Qué es el sonido?

El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga bajo la forma de una variación periódica de presión. Dicho de una manera más sencilla, es una variación de la presión ambiental que se propaga en forma de ondas y estimula el sentido del oído. El sonido es una onda longitudinal; es una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos del medio. Cada molécula transmite la energía a las moléculas vecinas, pero una vez que pasa la onda de sonido, cada molécula permanece en su sitio.

Esta variación de la presión es lo que se denomina *presión acústica* (P). Suele ser débil, por lo que para su medida se utilizan magnitudes más cómodas que el *bar*, como el *bar*, o el pascal (Pa).

Cada medio, sólido, líquido o gaseoso, ofrece una facilidad más o menos grande para la propagación del sonido. Por analogía con la corriente eléctrica, se dice que el medio posee una *impedancia acústica* (Z).

La impedancia se define como el cociente entre la presión acústica (P) y la velocidad del sonido (v):

$$Z = \frac{P}{v}$$

Para el caso de las ondas planas se puede expresar también por:

$$Z = \rho \cdot c$$

Siendo ρ la densidad y c la velocidad de propagación en el aire.

Se mide en Ohmios acústicos, $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$, o Rayls, $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$.

¿Qué es un sonido complejo?

Cualquier sonido sencillo puede describirse en su totalidad especificando tres características de su percepción:

tono, timbre e intensidad. Estas características corresponden a tres características físicas: frecuencia, composición armónica (forma de la onda) y amplitud o presión acústica:

Me centraré en el tono y la intensidad, puesto que el timbre es un aspecto poco relevante en mi trabajo.

El tono es la cualidad mediante la cual el oído distingue entre un sonido grave y uno agudo. La magnitud física asociada es la frecuencia: los sonidos graves corresponden a frecuencias bajas, mientras que los agudos son debidos a frecuencias altas.

La intensidad diferencia entre sonidos fuertes o débiles. En realidad, cuando hablamos de sonidos fuertes o débiles, nos estamos refiriendo a la sensación de intensidad, la sonoridad o el nivel sonoro. Esta característica está relacionada con la amplitud (intensidad acústica, o presión acústica) y la frecuencia: es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud, y disminuye al aumentar la distancia al foco.

Si la presión acústica está por debajo de $2 \cdot 10^{-4}$ bar, está por debajo del Umbral Auditivo, y el oído humano no lo oye. Por el contrario, una presión superior a 103 bar puede causar lesiones irreversibles, pues está por encima del Umbral Doloroso. La ley de Weber–Fechner dice: *Nuestras impresiones sonoras varían según una progresión aritmética, cuando las excitaciones físicas que las causan varían según una progresión geométrica.*

Según esta afirmación, la forma de establecer la medida del nivel sonoro producido por una presión acústica P , se realiza mediante la fórmula:

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ dB}$$

;

siendo:

$P_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ bar, presión acústica del umbral auditivo, y

L = nivel sonoro en dB

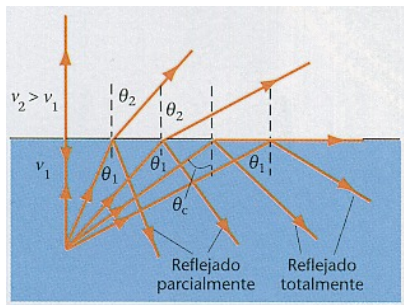
La intensidad sonora (que no sensación de intensidad), definida como energía por unidad de superficie (W/m^2), es proporcional al cuadrado de la presión acústica, por lo que esta misma fórmula puede expresarse así:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

;

siendo $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, la intensidad del umbral auditivo.

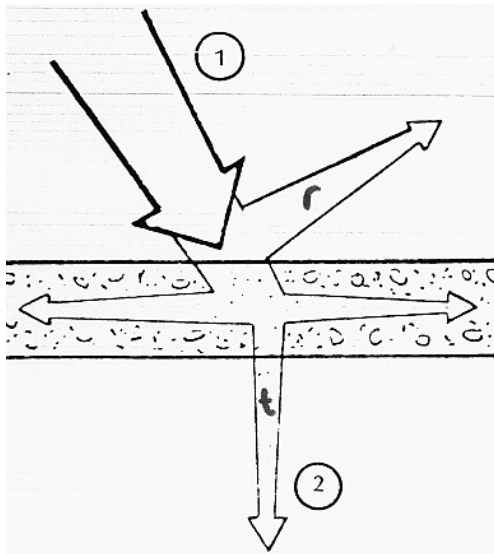
El otro factor que influye en la sonoridad es la frecuencia, lo que significa que intensidades acústicas iguales a diferentes frecuencias pueden dar sensaciones de intensidad distintas. Hay estudios sobre la sensibilidad del oído con la presión sonora (o nivel acústico) que se resumen en unas curvas que dan esta variación de sensibilidad en función de la frecuencia:



Ángulos de reflexión–refracción.

La cantidad de energía sonora reflejada por una superficie depende de la clase de superficie, el material del que esté hecha, etc

En esta figura aparecen dos medios, 1 y 2, cuyas impedancias son, respectivamente, Z_1 y Z_2 . Consideramos una onda incidente i que va del medio 1 al medio 2. Al llegar al límite, parte de la energía sonora se refleja mediante una onda reflejada r , y otra parte se transmite al medio 2 mediante una onda transmitida t .



Onda reflejada y transmitida

Se define:

Factor o coeficiente de transmisión:
$$t = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Factor o coeficiente de reflexión:
$$r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Esta última ecuación nos indica que cuanto mayor sea la diferencia entre Z_1 y Z_2 , la reflexión será mayor y, por tanto, existirá una elevada amortiguación del sonido.

Generalmente, en lugar del factor de reflexión r , se emplea el *grado de absorción*, que se define como la fracción de energía de onda incidente que no es reflejada. La energía es proporcional al cuadrado de la presión sonora; entonces podemos escribir:

$$= 1 - r^2$$

ððððð ððð ð ðððððððððððððð

En el caso de las ondas sonoras, la reflexión en una pared explica el fenómeno del eco. Cuando la onda incidente y la reflejada impresionan el oído del mismo observador con intermitencia suficiente para la percepción de los dos sonidos, se produce este fenómeno. El intervalo de tiempo mínimo para que nuestro oído perciba dos sílabas distintamente es 0,1 segundos. Si consideramos la velocidad del sonido como de 340 m/s, el espacio que debe recorrer la onda en su ida y vuelta del oído al obstáculo es:

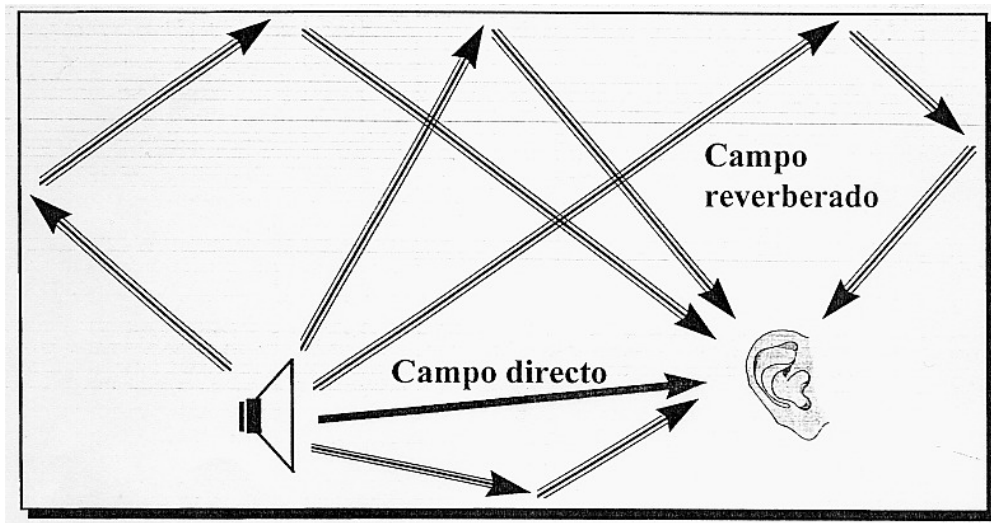
$$s = 0,1 \cdot 340 = 34 \text{ m}$$

La distancia mínima entre el oído y la superficie reflectora debe ser alrededor de 17 m para que se produzca eco.

La reverberación es el fenómeno de sucesivas reflexiones del sonido en distintas superficies. Al emitir un sonido en un local, se refleja en las paredes, suelo, techo y en todos los obstáculos que impiden su libre propagación. Si los obstáculos son buenos reflectores del sonido, éste persiste un largo tiempo dando ocasión a que sean percibidos por el auditorio varios sonidos a la vez, alterándose, así, la belleza musical de un concierto o haciéndose ininteligible un orador.

El tiempo de reverberación es el que transcurre desde que deja de producirse es sonido hasta que deja de ser perceptible. No debe ser muy largo por los inconvenientes antes mencionados, pero tampoco muy corto, porque, por ejemplo, en una gran sala de conciertos, no se captaría el sonido en todos los puntos. El tiempo de reverberación óptimo es de 1 a 2 segundos.

La presión acústica que existe en un punto determinado de un recinto cerrado, después de haberse producido varias reflexiones del sonido, es la resultante de la presión del *campo directo* y el *campo reverberado*, como se indica en el dibujo:



Campo directo y reverberado

Por tanto, el nivel de presión acústica en un punto depende mucho de la absorción acústica de las superficies que limitan el recinto.

Considerando una fuente de propagación omnidireccional, el nivel de presión sonora en un punto viene dado

por la expresión:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A}$$

;

siendo: $A = \alpha_i S_i$

y donde:

L_p – nivel de presión en el punto considerado (dB)

L_w – potencia acústica de la fuente (dB)

r – distancia del punto considerado a la fuente (m)

A – absorción acústica debida al material (m²)

ððððð ðððððððððð ððð ððððððð ðð ðð ðððððð ððððððð

La propagación del sonido no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación; es decir, la presión o la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco sonoro. Parte de la energía se convierte en calor cuando viaja a través del medio (hablaré del aire por ser el más habitual). Existen diferentes causas que dependen de la humedad relativa del medio, la frecuencia y, en menor medida, la temperatura.

Los sonidos de alta frecuencia son amortiguados en mayor medida que los de baja frecuencia. En este gráfico podemos ver cómo influye la humedad relativa en la amortiguación, para diferentes frecuencias. El máximo de amortiguación se obtiene para un aire muy seco.

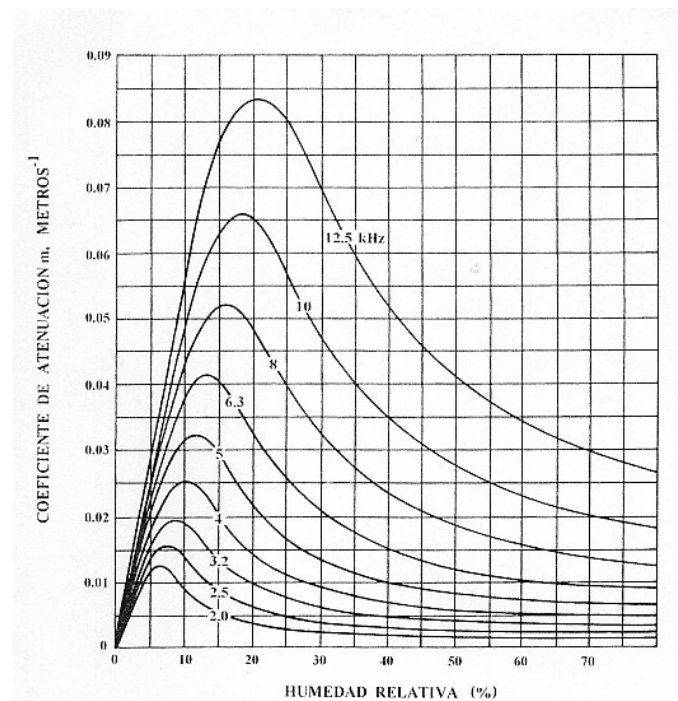


Gráfico de amortiguación con la humedad. Absorción del aire a 20°C.

El coeficiente de absorción m de la energía acústica en el aire se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$m = 8,94 \cdot 10^{-4} \frac{f^2}{\rho c^3}$$

(m-1)

donde:

f – frecuencia de la onda

– densidad del aire

c – velocidad del sonido en el aire

Por tanto, la absorción del aire viene dada por:

$$A_{\text{aire}} = 4 m V$$

(m2)

donde:

m – coeficiente de absorción por metro (m-1)

V – volumen del recinto (m3)

Si consideramos una fuente de sonido omnidireccional en espacio libre, a medida que nos alejamos de la misma se produce una disminución de la presión sonora inversamente proporcional a la distancia.

La expresión general del nivel de presión sonora a una distancia r de la fuente es:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2$$

donde:

L_p – nivel de presión acústica a distancia de la fuente (dB)

L_w – potencia acústica de la fuente (dB)

r – distancia de la fuente (m)

~~~~~

Cuando entramos en una casa sin amueblar, o en obras, o en un portal con escasos muebles, nuestra voz hace eco. Este fenómeno se da porque los materiales de acabado de interiores, tales como hormigón, yeso, vidrio, terrazo, etc..., son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser muy reflectantes. Una vez amueblada la casa, las alfombras y cortinas absorben cantidades importantes de energía acústica, gracias a su porosidad, reduciendo la reverberación previa.

El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda y del ángulo con el que incide sobre la superficie, y se obtiene por el método de la cámara reverberante,

que es un método de integración, en el que las ondas chocan con la muestra de ensayo desde diferentes direcciones. El coeficiente que se calcula se considera como un valor medio para todos los ángulos de incidencia, y se llama de *Sabine*,  $\alpha$ . Para materiales muy absorbentes, el valor de  $\alpha$  puede sobrepasar el valor 1, teóricamente el máximo de absorción, debido a diversos efectos, por ejemplo de difracción.

Las pérdidas de energía acústica en los materiales se pueden caracterizar mediante el *coeficiente de absorción acústica*, entendiendo por tal a la relación entre la energía acústica absorbida y la energía acústica incidente, por unidad de superficie. Puede variar desde un 1 o un 2% (reflexión total) a un 100% (absorción total).

La absorción  $A$  es la magnitud que cuantifica la energía extraída del campo acústico cuando una onda atraviesa un medio determinado. Está determinada para las diferentes frecuencias  $f$  por:

$$A_f = \alpha_f S$$

(m<sup>2</sup>)

donde:

$S$  – área total de las superficies (m<sup>2</sup>)

$\alpha$  – coeficiente de absorción de un material a una determinada frecuencia

Cuando se trata de objetos difícilmente asimilables a superficies planas, tales como butacas, se usa el concepto de *área de absorción sonora equivalente*, que es el área de un absorbente que, con un coeficiente de *absorción acústica unidad*  $A_u$ , produce la misma absorción total:

$$A_u = \frac{A}{N_u}$$

Se consideran absorbentes sonoros aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora en todo o parte del espectro de frecuencias audibles. Se pueden clasificar según el siguiente esquema:

Esquema de absorbentes sonoros.

Los únicos de entre los considerados aquí con características de verdadero material, son los materiales porosos, el resto son dispositivos y estructuras absorbentes. Estos materiales porosos están constituidos por un medio sólido (esqueleto), recorrido por cavidades más o menos tortuosas (poros), comunicadas con el exterior.

Al incidir una onda acústica sobre la superficie del material, un importante porcentaje de la misma penetra por los poros, haciendo vibrar la fibra, con lo que parte de la energía acústica se transforma en energía cinética. Lógicamente, la absorción de energía acústica por estos materiales dependerá mucho de su porosidad, aunque también tiene mucho que ver el espesor de la capa de aislante, y la frecuencia de la onda. No son materiales absorbentes acústicos los materiales porosos sin intercomunicación entre cavidades ni con el exterior. Los materiales porosos, para obtener un grado de absorción del 99%, necesitan un espesor determinado para cada frecuencia, equivalente a  $\lambda/4$ .

Desde el punto de vista del comportamiento acústico conviene distinguir entre materiales de esqueleto rígido y flexible. En los primeros, el coeficiente de absorción acústica aumenta con la frecuencia, siendo absorbentes preferentes de frecuencias altas, mientras que los segundos presentan resonancias de absorción a frecuencias altas y medias.



obtendremos la absorción, primero de la cámara vacía, y después de la cámara con el objeto de prueba. La diferencia entre ambos resultados de absorción será la absorción del material:

$$A = A_2 - A_1 = \frac{0,16 V}{T_2} - \frac{0,16 V}{T_1} = 0,16 V \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}$$

Con la absorción característica del material, podemos conseguir el coeficiente de absorción de Sabine de dicha muestra:

$$\alpha_s = \frac{A}{S}$$

; siendo S la superficie de la muestra.

La normativa UNE–EN 20354 exige ciertas características que debe cumplir la cámara reverberante, y la metodología a seguir:

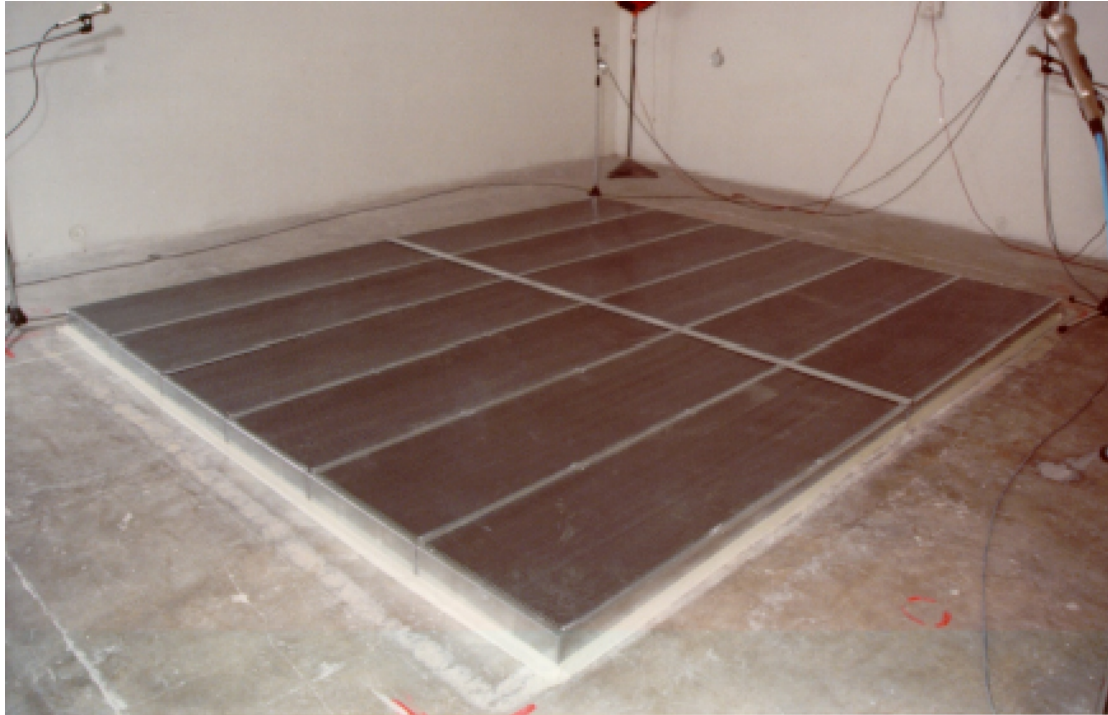
- 1: El volumen de la cámara debe ser, aproximadamente, de 200 m<sup>3</sup>.
- 2: La cámara debe permitir una gran difusión del campo sonoro, para lo que se necesitan difusores suspendidos (grandes placas que cuelgan del techo dispuestas de manera especial para provocar gran reverberación)
- 3: El área de la muestra debe ser de 12 m<sup>2</sup>, en forma rectangular. Las dimensiones de comercialización de los productos que he estudiado son muy diversas, así que se montan de tal manera que quede en el suelo de la cámara un gran panel de 3 x 4 m. Este debe encuadrarse en un marco de sección rectangular de material reflectante, en este caso madera, que se adapte perfectamente a la muestra.
- 4: La humedad relativa de la cámara debe ser superior al 40%, y la temperatura, superior a los 10°C. En las experiencias que he realizado, las condiciones han sido las siguientes:

Humedad relativa: 51%; Temperatura: 16,5°C; Presión: 940 mb.

Para la recogida de datos he usado un ordenador, conectado a unos micrófonos que hay dentro de la sala, que recogen el sonido en cada momento. El ordenador procesa los datos que le llegan y da gráficas como esta:

Con tiempos de reverberación en cada caso, como ya he explicado, se obtiene la absorción, y el coeficiente de absorción sonora de Sabine, que es el que se refleja en las gráficas.

No incluyo un análisis de errores, puesto que la precisión de los aparatos es suficiente para el nivel de mi monografía.



Fotografías de la cámara reverberante. No se aprecian los resonadores que cuelgan del techo, pero se da una visión muy clara del montaje de la muestra.

### Conclusión

Tras haber estudiado detenidamente el comportamiento de las ondas acústicas en diferentes medios, y los coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales, puedo concluir que:

- La capacidad de absorción de un material decrece con una disminución del espesor de dicho material, como puede observarse al comparar las gráficas del *panel de lana de roca de 40 cm*, y el mismo de *50 cm* de espesor.
- Una disminución en el espesor o en la porosidad del material origina un cambio de la absorción máxima hacia las altas frecuencias.
- El coeficiente de absorción disminuye a bajas frecuencias. La tendencia general de casi todas las gráficas estudiadas es creciente a más altas frecuencias.
- El gráfico  $S/f$  es muy parecido en materiales iguales, pero de distinto espesor. Esto se deduce de comparar las gráficas de los *paneles de lana de vidrio*, y las de *lana mineral arena*: las gráficas de cada familia tienen

una forma característica, aunque, como ya he dicho antes, varían con el espesor.

- La rigidez del esqueleto de ciertos materiales porosos influye en su absorción a determinadas frecuencias, como se observa al comparar la forma característica de los *paneles de lana de vidrio semirrígidos y rígidos*.
- Al añadir en una de las caras del panel un elemento de otra naturaleza, menos poroso, la absorción del panel varía considerablemente, más en las altas frecuencias. Queda esto claro en las experiencias del *panel rígido de lana de vidrio* y *panel rígido de lana de vidrio*, recubierto en una de sus caras con un film de PVC.

Las aplicaciones más comunes que se dan a este tipo de investigaciones se dan en la construcción, no sólo de auditorios y salas de conferencias, sino también en las casas, escuelas, hospitales, oficinas, etc.

La calidad de la audición sonora, o el ambiente acústico necesario para facilitar una escucha determinada, depende de la función del recinto en cuestión; por ejemplo, en teatros, auditorios, estudios de grabación y doblaje la audición es más crítica que en cines, viviendas, oficinas, etc. Es necesario un grado de difusión acústica uniforme en todos los puntos del recinto, fijándose en que el tiempo de reverberación sea el adecuado en cada caso. Por ello, hay que tener muy presente la finalidad del local al calcular y diseñar el modelo acústico a seguir, ya que sería un gran fracaso dotar de una grandísima absorción a una sala de conciertos, por ejemplo, donde lo que se busca es que el sonido llegue a todos los rincones, y sin embargo, dejar con gran reverberación un cine, pues se haría imposible entender una sola palabra.

### 000000000000

- de la Colina, Carlos; y Moreno, Antonio. *Acústica en la edificación*.2
- Recuero López, Manuel. *Acústica arquitectónica aplicada*. Ed. Paraninfo. Madrid, 1999.
- Típler, Paul A. *Física para la ciencia y la tecnología, Vol.1*. Ed. Reverté. Barcelona, 2002.
- VV.AA. *Enciclopedia Microsoft Encarta*. Vers. 1.999.
- VV.AA. *Manual de aislamiento en la edificación*. Isover.
- [www.eie.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/hospital.htm](http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/hospital.htm)
- [www.elrincondelvago.com](http://www.elrincondelvago.com)
- [www.ideal.es/waste/acustica.htm](http://www.ideal.es/waste/acustica.htm)
- [www.isover.net](http://www.isover.net)
- [www.ruidos.org](http://www.ruidos.org)

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover.

: Fuente: Típler, Paul A. *Física para la ciencia y la tecnología, Vol.1*. Ed. Reverté. Barcelona, 2002

: Fuente: Típler, Paul A. *Física para la ciencia y la tecnología, Vol.1*. Ed. Reverté. Barcelona, 2002

: Si la frecuencia de dicha variación está comprendida entre 15 y 20.000 Hz

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover.

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover

: Fuente: Típler, Paul A. *Física para la ciencia y la tecnología, Vol.1*. Ed. Reverté. Barcelona, 2002

: Fuente: Típler, Paul A. *Física para la ciencia y la tecnología, Vol.1*. Ed. Reverté. Barcelona, 2002

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover

: *Campo directo*: ondas que se han propagado desde la fuente sin chocar.

*Campo reverberado*: ondas que han chocado una o varias veces contra las superficies que limitan el local

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover

: Este efecto no debe considerarse en principio como una amortiguación del sonido en sí, sino más bien como una disminución de la amplitud originada por la distribución de la energía en un volumen mayor.

: ver experiencia del panel semirrígido de lana de vidrio, cuyo  $\alpha$  a 4000 Hz es de 1,03.

: Fuente: VV.AA. Manual de aislamiento en la edificación. Isover

dB

100

40

Caída de

60 dB

t (s)

T2

T1

Ruido de fondo

3 m

4 m

Grafica del tiempo de reverberación para un tono de 4000 Hz