

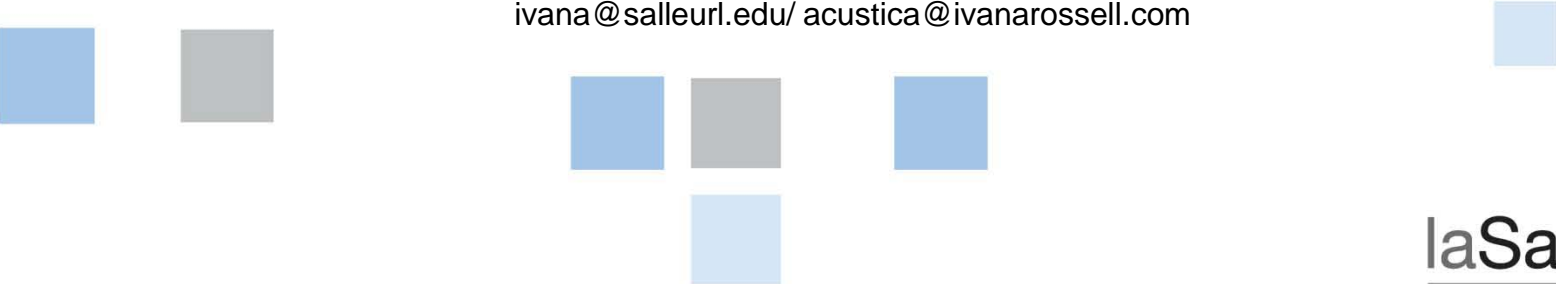


1.1

MATERIALES ABSORBENTES

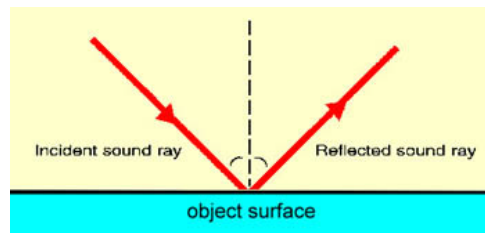
Ivana Rossell Turull

Directora del Máster de Acústica Arquitectónica y Medioambiental
Gerente de Ivana Rossell - Acústica
ivana@salleurl.edu/ acustica@ivanarossell.com



Estudio acústico de salas:

Existen tres teorías para afrontar el diseño acústico completo de un espacio. Estas teorías se complementan entre ellas. La **Teoría estadística** es la más usada, pues aporta una formulación útil, aunque aproximada. La **teoría geométrica** es la usada por los programas informáticos que cada vez se aproximan más a la realidad (los programas también incorporan formulación de la teoría estadística). Se basa en equiparar el fenómeno de la reflexión sonora como la reflexión de rayos, siguiendo las bases de la óptica geométrica (reflexión especular). La **Teoría ondulatoria** parte del comportamiento ondulatorio del sonido. Da soluciones para los casos con problemas de coloraciones acústicas (mala distribución y densidad de modos propios). Estos problemas suelen darse en salas pequeñas (small room acoustics).



reflexión especular:

ángulo de incidencia= ángulo de reflexión

(respecto la perpendicular al plano de reflexión en el punto de incidencia)

MATERIALES ABSORBENTES

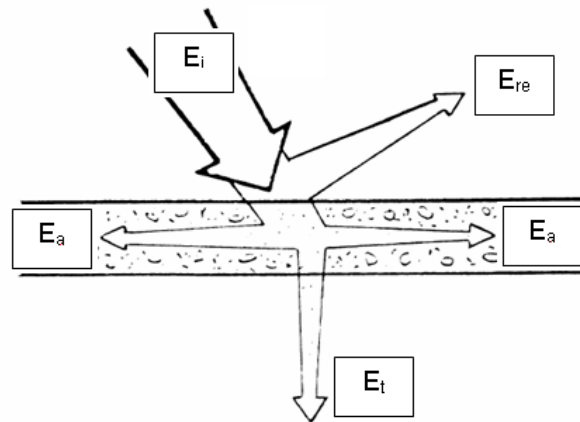
Absorción del sonido

Dado que la energía sonora en un recinto tratado con material absorbente disminuye respecto a cuando no existe tratamiento acústico, debemos aceptar que se produce una disipación de energía sonora en otras formas de energía. Esta disipación de la energía sonora se denomina absorción acústica.

La capacidad de absorción sonora se debe a las pérdidas de energía sonora en la superficie o en el espesor del material, dependiendo de su estructura, densidad, elasticidad y otras propiedades físicas.

Balance energético:

Cuando una onda sonora incide en una superficie, por ejemplo una pared, sucede que la energía sonora de esa onda, llamada energía incidente [E_i], se distribuye de la siguiente forma:



Una parte de la energía que incide sobre esa pared se refleja desde ella hacia el interior del recinto. A esta energía se le llama energía reflejada [E_{re}].

Otra parte de la energía incidente se transmite parcialmente hasta los límites del recinto, saliendo del recinto a través de otras paredes o a través de los cimientos. La denominamos energía transmitida [E_t].

El resto se pierde en el mismo material, es decir, se transforma en otros tipos de energía. Es la energía absorbida [E_a].

Por lo tanto, la energía sonora total incidente $[E_i]$ se descompondrá obedeciendo al siguiente balance energético:

$$E_i = E_a + E_r + E_t$$

Dividiendo miembro a miembro por E_i en la expresión anterior obtenemos:

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i}$$

$$1 = \alpha + r + \tau$$

Coeficiente de absorción

Es la relación entre la energía absorbida por un material respecto la energía que ha incidido en él.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \qquad \begin{array}{l} E_a = \text{Energ. Absorbida} \\ E_i = \text{Energ. Incidente} \end{array}$$

Al ser una relación energética es adimensional.

Por conservación de energía, debe tomar siempre un valor comprendido entre 0 y 1.

En ocasiones puede ocurrir que encontremos un coeficiente de absorción α sea superior a 1. Esto no debe conducir a la interpretación errónea de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente (hecho imposible). La justificación proviene de que el método de medida utilizado tiene errores y puede dar resultados física y conceptualmente imposibles.

El coeficiente de absorción depende de:

- el tipo de material sobre el que incida
- el montaje o forma del material
- la frecuencia de la onda incidente (el valor del coeficiente de absorción acostumbra a darse por bandas de octava o tercio de octava).
- el ángulo de incidencia del sonido (al dar el valor del coeficiente de absorción debería indicarse si es para incidencia normal o incidencia aleatoria, rasante, o para un ángulo en concreto, etc). Este dato no se suele usar, pues sería muy costoso caracterizar la absorción de los materiales para cada ángulo de incidencia. Suele usarse un valor correspondiente a incidencia aleatoria.

$$\alpha = f(frec, \mathcal{I}_i, mat, mont)$$

Área de absorción equivalente (A); Cuantificación de la absorción:

Para el caso de materiales que cubren una superficie dentro de la sala:

W. C. Sabine (padre de la acústica arquitectónica) define el área de absorción equivalente de un material como el producto del coeficiente de absorción del material por la superficie que ocupa.

$$A = \alpha \cdot S \quad [\text{Sabinios}] \quad [\text{m}^2]$$

El área de absorción equivalente podría definirse como el área que debería tener una ventana abierta (alfa igual a 1) para proporcionar la misma absorción que la superficie de material absorbente a estudio.

La absorción (A) se cuantifica en Sabinios o m².

El área de absorción equivalente de una superficie también puede calcularse con dependencia logarítmica:

$$A = S \cdot (-\ln(1 - \alpha))$$

Para el caso de Objetos o elementos dentro de una sala:

Para el caso de objetos, la absorción se cuantificará a partir de la absorción de un objeto (dada en sabinios) y multiplicada por el número total de objetos:

$$A = n \cdot A_{ob}$$

Área de absorción equivalente de una sala:

El área de absorción equivalente total de una sala se calcula como la suma de las absorciones de todas las superficies y objetos de la sala.

$$A = \sum A_i$$

MATERIALES ABSORBENTES:

Los materiales absorbentes pueden definirse como aquellos que tienen la propiedad de absorber una parte significativa de la energía sonora cuando la onda incide en el material.

En general, la función de este tipo de materiales es la de controlar las reflexiones de un recinto, proporcionando mejoras tanto sobre reflexiones indeseadas como sobre una reverberación excesiva.

Tipos de materiales absorbentes

Clasificación general:

En términos generales los materiales absorbentes pueden clasificarse en dos grupos: **Materiales absorbentes de tipo poroso** y **Materiales absorbentes de tipo resonador**.

En una clasificación más detallada, hablaremos de 4 grupos de materiales:

- 1- Materiales porosos flexibles y no flexibles
- 2- Materiales flexibles
- 3- Paneles membrana
- 4- Resonadores

Al final del capítulo veremos otros materiales absorbentes, que quedan fuera de estas clasificaciones.

1- Materiales porosos flexibles y no flexibles

Los 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 intersticios haciendo entrar en vibración a las fibras, con lo que se produce una transformación en energía cinética de parte de la energía acústica.

Por otra parte, el aire que ocupa los poros entra en movimiento, produciéndose unas pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas con el esqueleto, que se transforma en calor.

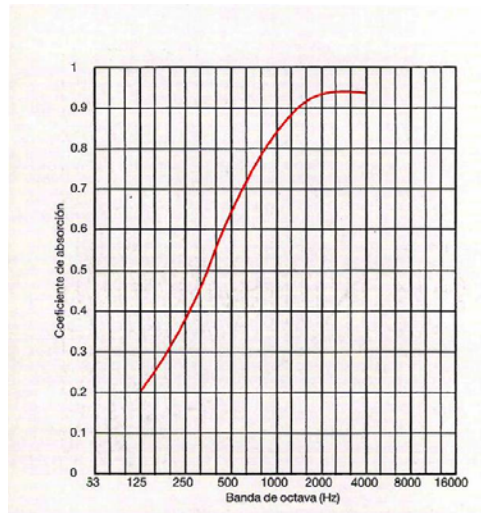
Ejemplos: lanas y fibras minerales, fieltros, alfombras, cortinas, moquetas, personas, etc.

La absorción del material depende de los siguientes parámetros:

- Espesor de la capa de material.
- Frecuencia del sonido.
- Porosidad del material.
- Montaje.

Son materiales que presentan buena absorción a altas frecuencias. A más espesor, más absorción a medias y baja frecuencia.

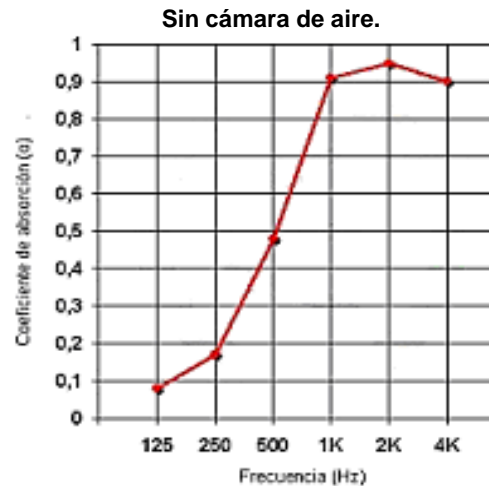
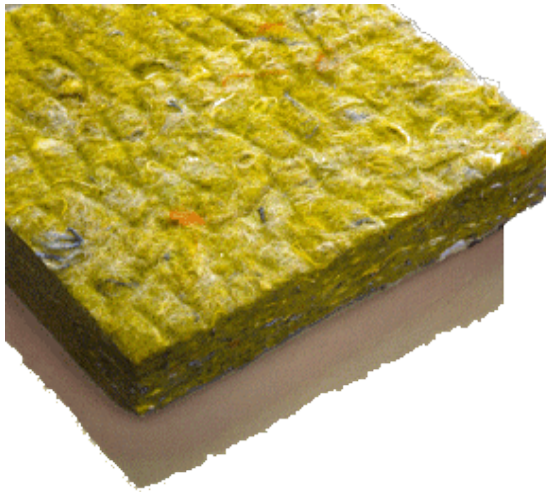
Característica de absorción típica:



Ejemplos de materiales absorbentes porosos.

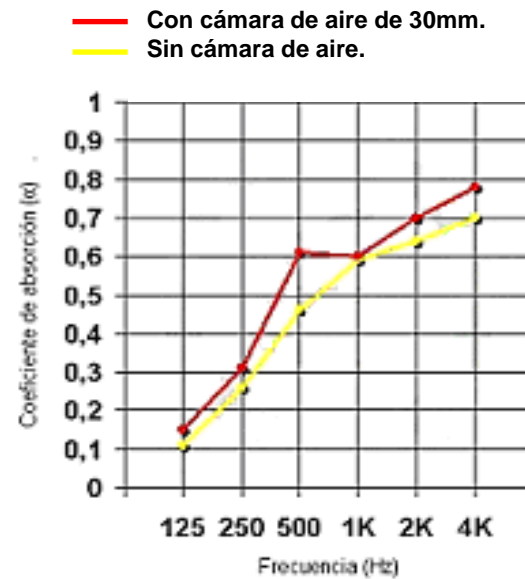
Lana de roca:

Filtro de fibras textiles entrelazadas entre ellas por resinas especiales. Debido a su estructura altamente porosa tiene una gran capacidad de absorción acústica a altas frecuencias.



Ejemplos de materiales absorbentes porosos.

- Material absorbente compuesto de fibra de poliéster.

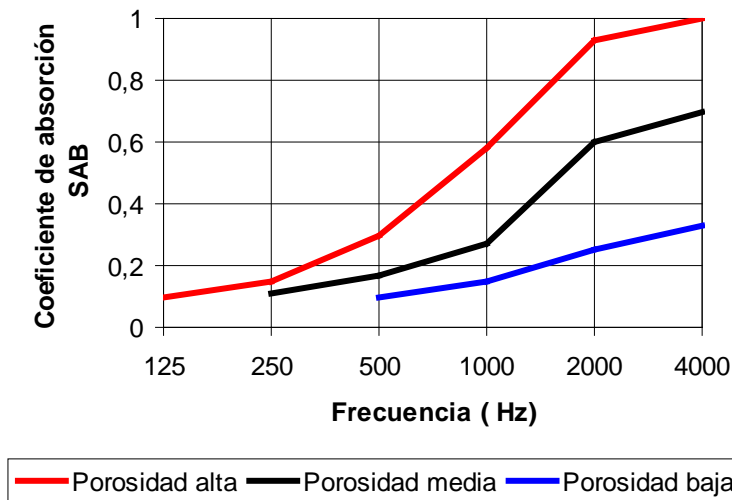


Variación de la absorción en función de la porosidad del material

Al aumentar la porosidad de un material también aumenta la absorción a todas las frecuencias.

Este efecto, era de esperar ya que a medida que se incrementa el grado de porosidad la penetración de la onda incidente es mayor.

Ejemplo: coeficiente de absorción de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes.



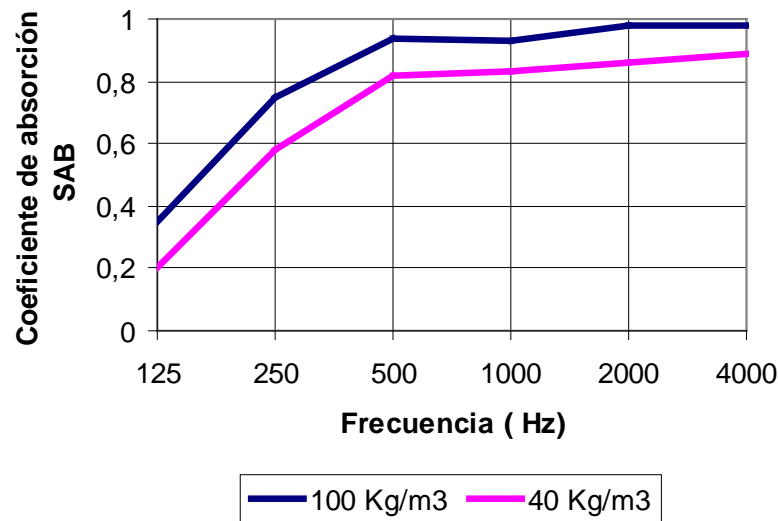
Variación de la absorción en función de la densidad del material

Si la densidad del material es baja existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña.

A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de la absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

Desde un punto de vista práctico se aconseja que los materiales basados o similares a lanas minerales tengan una densidad situada aproximadamente, entre 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/ m³

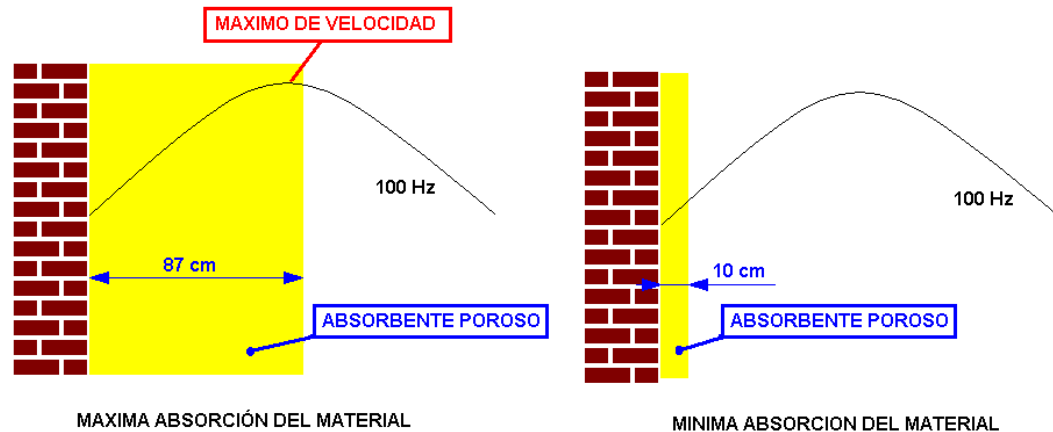
Ejemplo: valores de los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m³ respectivamente.



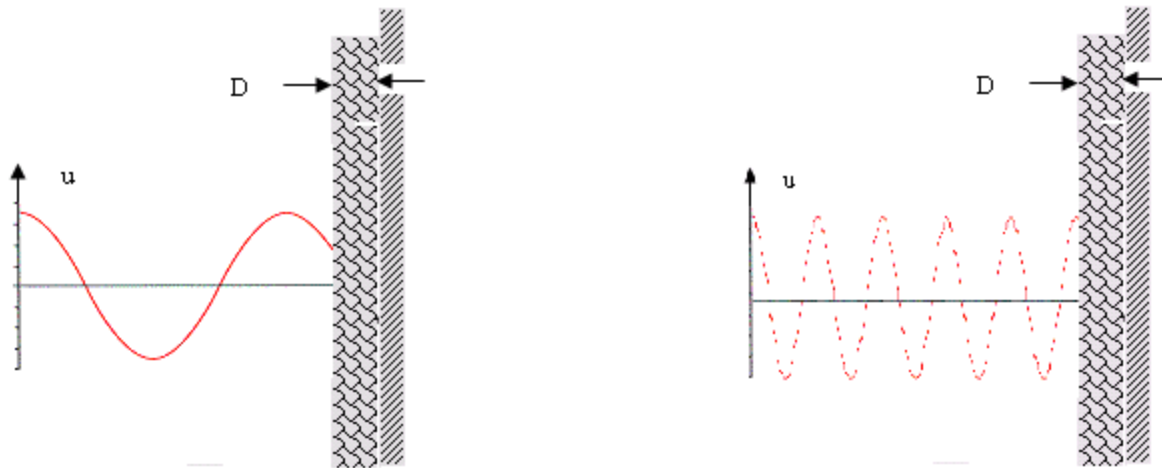
Variación de la absorción en función del espesor del material

Muchas veces los absorbentes porosos son llamados absorbentes de velocidad. La máxima eficacia de absorción se obtiene cuando la onda (partículas en movimiento) está dentro del material en los puntos de máxima velocidad, ya que así existe una fricción máxima y por tanto, máxima absorción. (Cuando la velocidad de la onda es baja, implica que las partículas se mueven poco, y por tanto, la absorción es forzosamente es baja).

Si analizamos el comportamiento a partir de la onda de velocidad, estudiando el caso para una onda de una única frecuencia, encontramos un cero de velocidad en el punto en que la onda llega a la pared rígida (justo cuando la onda llega a la pared, se encuentra impedancia infinita; movimiento nulo= velocidad cero). Si el cero de velocidad está en la pared (por condiciones de contorno), encontramos el primer máximo de velocidad a una distancia igual a $\lambda/4$ de la pared:



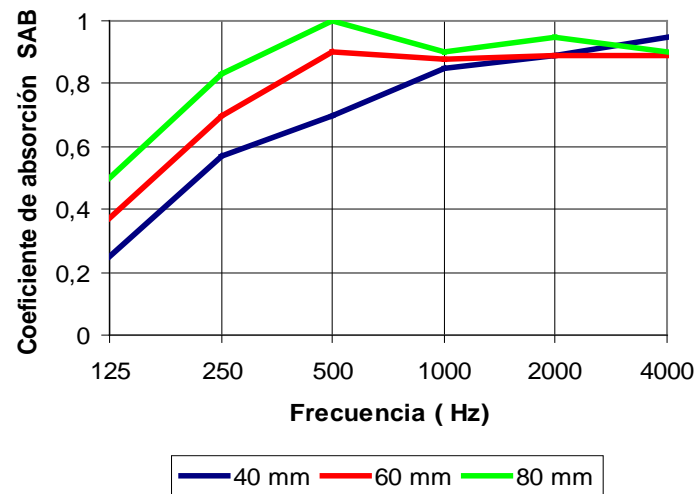
Colocar el material a esa distancia ayuda a aumentar la absorción, en comparación con la obtenida colocando el material pegado a la pared. El aumento es más notable para frecuencias bajas y medias. A alta frecuencia, puede perderse algo de eficacia.



A nivel práctico, pocas veces podremos colocar los absorbentes a una distancia $\lambda/4$ de la frecuencia que queramos absorber, pues son distancias muy grandes para el caso de aplicación a media y baja frecuencia.

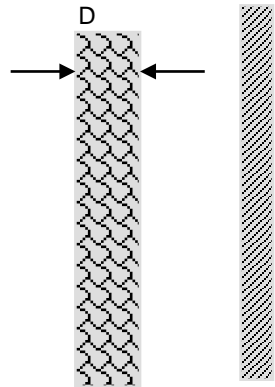
Sí pues, como conclusión: Si el absorbente poroso se separa de la pared o techo, la eficacia de absorción aumenta, sobretodo a media y baja frecuencia. El material pegado a la pared o techo tendrá una absorción baja, sólo a alta frecuencia.

Ejemplo: coeficiente de absorción de un material para diferentes espesores:



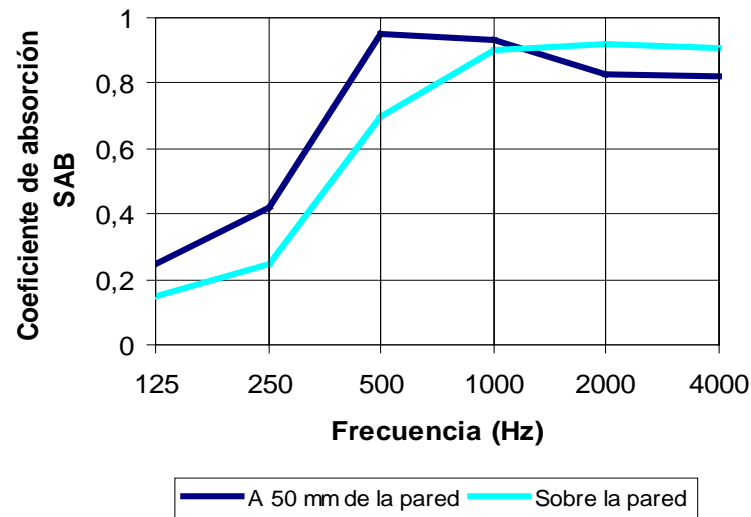
Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida

Si se pretenden obtener coeficientes de absorción muy elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material de espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared.



La máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia del material a la pared sea igual a $\lambda/4$. Pero generalmente nos interesará absorción en un margen amplio de frecuencias (no a una sola frecuencia). Para aumentar la absorción a bajas y medias frecuencias, será necesario incrementar la separación entre el material y la pared, además del espesor.

Ejemplo: coeficiente de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m³ de densidad, colocada de dos maneras, sobre una pared rígida y a 50 mm de la misma.



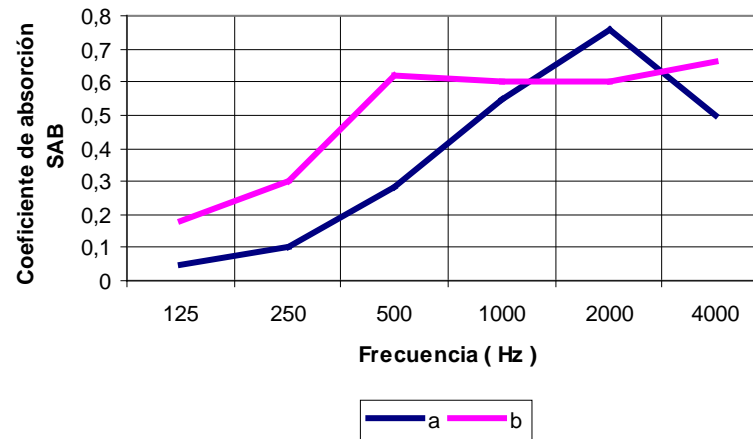
Según se observa con el montaje del material a 50 mm de la pared podemos obtener un coeficiente de absorción de 0,95 a 500 Hz, mientras que si observamos el montaje sobre la pared este valor no se obtiene hasta los 2kHz.

Este efecto puede comprobarse con frecuencia en el caso de las cortinas. Una cortina extendida sobre una pared, absorberá mucho menos que una cortina colocada a cierta distancia de ella .

Si además la cortina está fruncida, la absorción puede aumentar significativamente, pues se crea más distancia a la pared y se usa mucho más superficie de cortina para cubrir el mismo tramo de pared. Para que la absorción sea buena, la cortina debe tener un gramaje (g/m²) considerable; debe ser pesada. Aún así, la cortina da poca absorción a baja frecuencia.

Todo esto, debe tenerse muy en cuenta. (Condiciones de montaje).

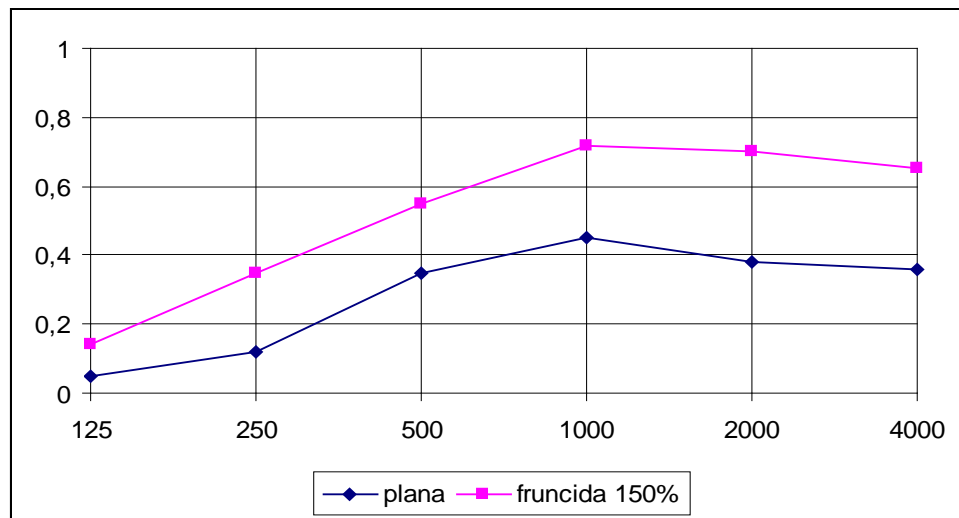
Ejemplo: coeficiente de absorción de una cortina fruncida 180%, montada de formas distintas, adosada a la pared y con una separación media de 14 cm. de la misma.



Sobre la pared ; b) separada un promedio de 14 cm de la pared

Como era de esperar al separar de la pared la cortina, aumenta la absorción a bajas frecuencias y además el alto porcentaje de fruncido suaviza la curva de absorción.

Ejemplo: suavizado de la curva de absorción comparando la misma cortina de 620 g/m², plana a la pared y fruncida al 150%



Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)

En muchas ocasiones resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes:

- Algunos absorbentes porosos, como las fibras o lanas minerales, producen alergias, picores, etc.

Con el tiempo pueden desprender partículas que pueden llegar a contaminar el aire de la sala.

- Si los materiales están alcance del público existe el peligro de que puedan ser dañados

- El arquitecto habitualmente desea ocultarlos por motivos estéticos.

A continuación se indican los recubrimientos más comunes:

- Velo acústicamente transparente
- Superficie microporosa
- Placa rígida de mortero poroso a base de granos de mármol, piedras naturales o cuarzo pigmentado
- Placa de viruta de madera fina aglomerada con magnesita o cemento
- Lámina de plástico o de papel

En algunos casos el recubrimiento es acústicamente transparente y en otros provoca una variación de la absorción del material que protege. La característica de absorción debe darse con la protección.

Ejemplo de paneles de lana de vidrio de alta densidad recubiertos con material microporoso:

Propiedades:

se puede lavar sin sufrir ningún deterioro

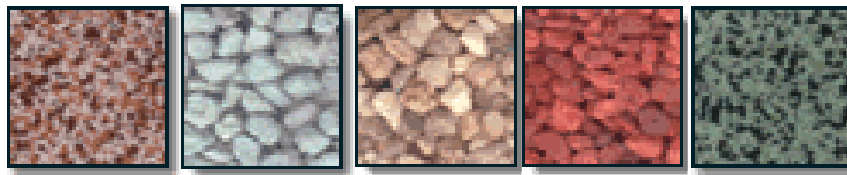
se puede curvar

se puede instalar en forma de falso techo

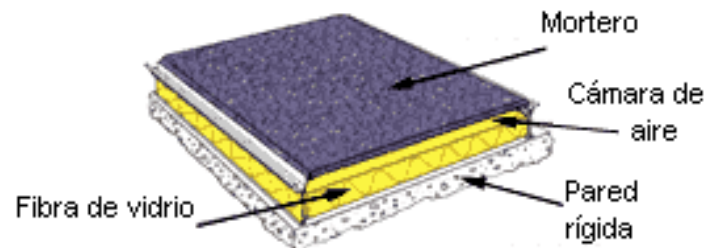


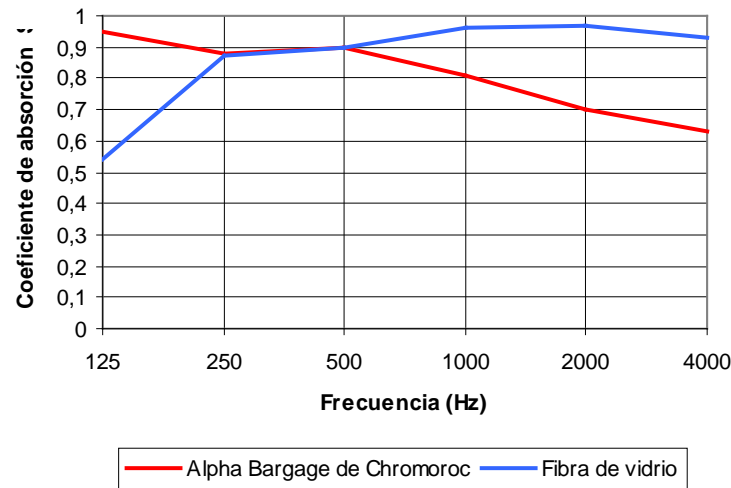
Ejemplo de placa rígida de mortero poroso

Placa de mortero poroso a base de piedras naturales aglomeradas con resina.



Croquis de un conjunto formado por una placa del tipo anterior colocada a una distancia de 150 mm de la pared. La cavidad entre la pared y la placa está rellena de lana de vidrio. También se muestra la gráfica de los valores del coeficiente de absorción del conjunto.

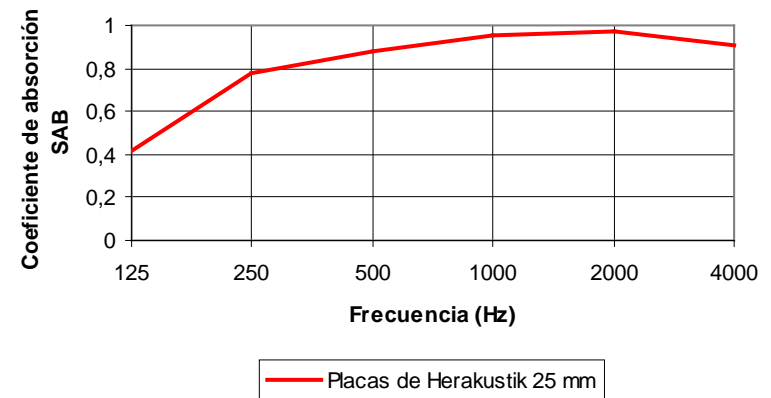
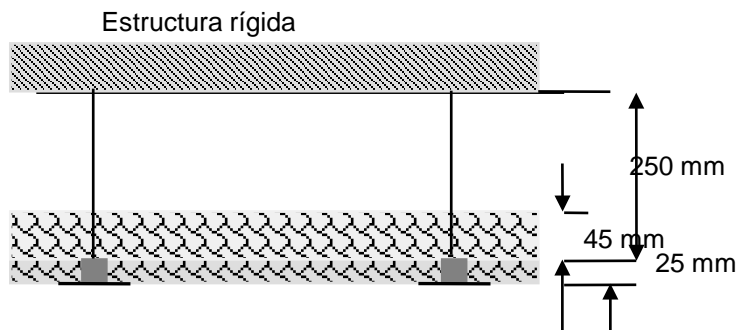




- Según observamos la absorción conseguida es muy elevada a bajas y a medias frecuencias. Ello es debido a que la placa también contribuye a la absorción global del conjunto en estas bandas. En cambio a altas frecuencias observamos una disminución menor respecto a la que presentaría la lana de vidrio sin ningún tipo de protección, esto es debido al obstáculo que presenta la placa al paso de la onda a dichas frecuencias (las longitudes de onda son muy inferiores a las correspondientes a bajas frecuencias)

Ejemplo placa de viruta de madera aglomerada con magnesita

Croquis de un posible conjunto formado por placas de 25 mm de espesor con cavidad de aire de 250mm y lana de vidrio de 45 mm y coeficiente de absorción del conjunto:



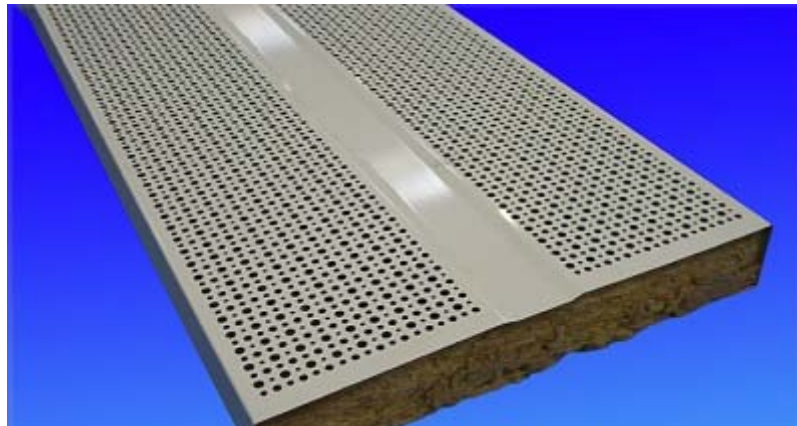
Protecciones acústicamente transparentes basadas en “chapas” perforadas:

Deben tener porosidad $> 30 \%$

Separación entre agujeros $< \lambda/2$

Longitud agujero (grosor de la chapa) $< \lambda/4$

Si la chapa perforada no cumple con estos mínimos, afectará a la absorción del material absorbente poroso que protege.



2- Materiales flexibles

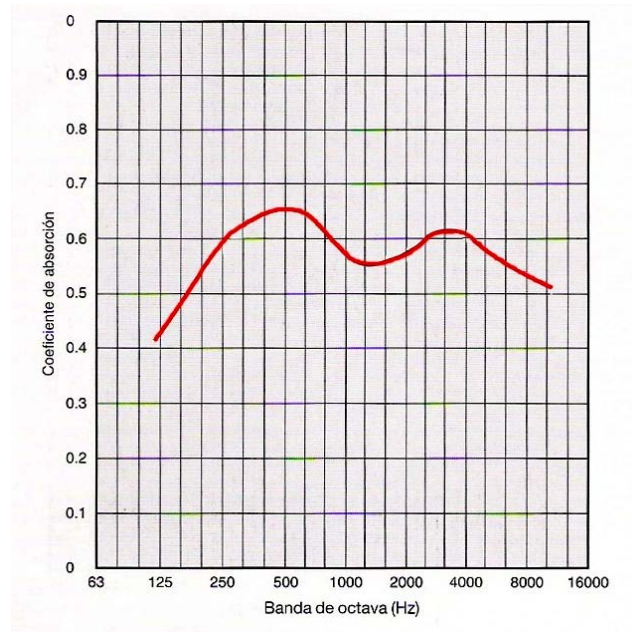
Estos materiales se hallan cubiertos, generalmente, por una superficie no porosa muy ligera ($m < 0.1 \text{ Kg/m}^2$) siendo el núcleo interior del material suficientemente poroso como para conseguir la flexibilidad deseada.

La absorción se debe a fricciones internas del esqueleto elástico, a la fricción del aire interior y al intercambio de calor entre el material poroso (o flexible) y la cubierta.

La absorción del material depende de los siguientes parámetros:

- Espesor de la capa de material.
- Frecuencia del sonido.
- Resistencia al paso del flujo de aire.
- Porosidad del material.
- Factor de estructura.
- Densidad superficial de la superficie que cubre.
- Rigidez y densidad del esqueleto.

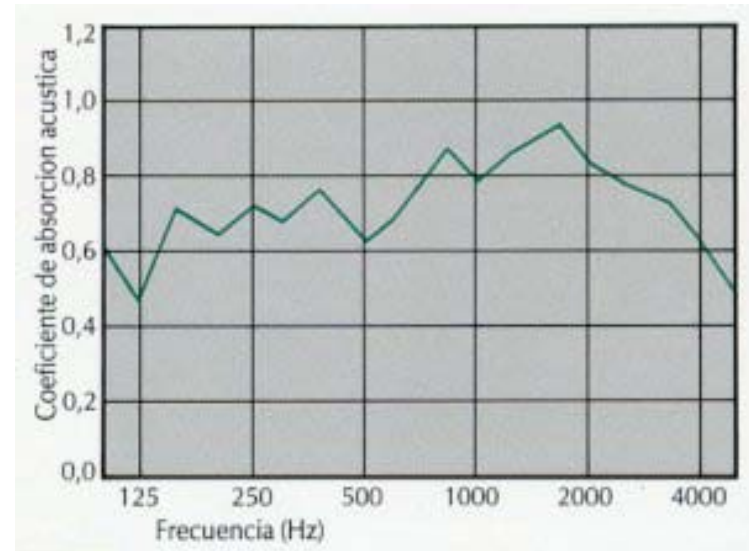
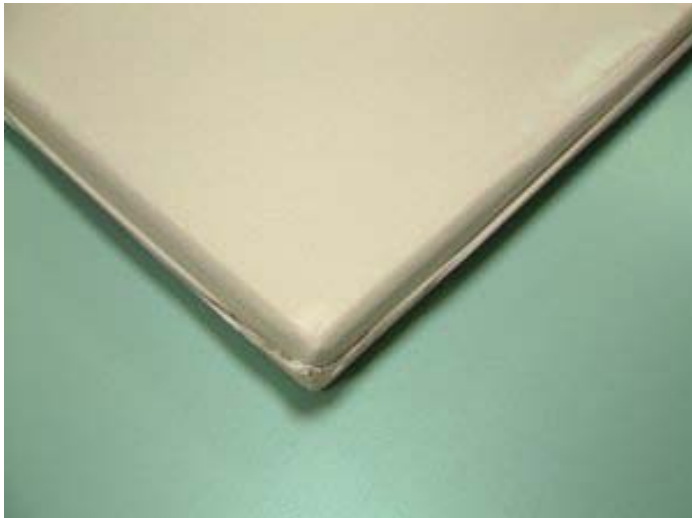
Característica de absorción típica:



Se utilizan para acondicionar salas en las que, por condiciones higiénicas, no pueden utilizarse materiales porosos sin proteger. Ejemplos: cocinas, hospitales, ...

Ejemplos de materiales absorbentes flexibles

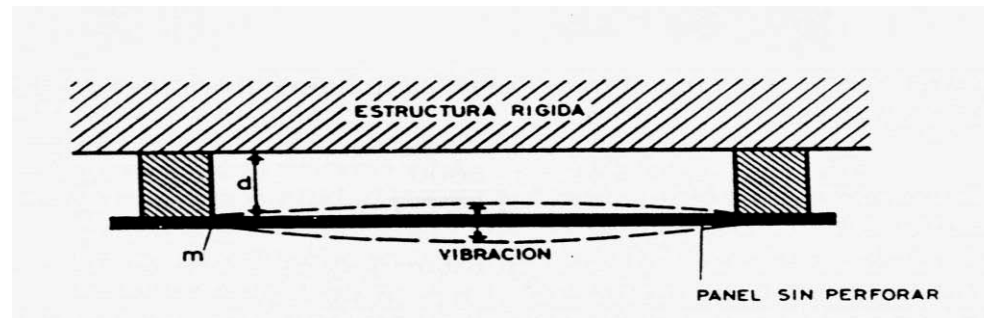
- Fibra mineral cubierta de plástico microperforado:



3- Paneles membrana

Se trata de paneles ligeros, denominados paneles membrana, montados a una cierta distancia de una pared rígida, formando así una cavidad. Esta cavidad puede rellenarse totalmente o parcialmente de material absorbente poroso.

El comportamiento de este sistema equivale a un sistema masa-muelle. Este sistema tiene un grado de libertad y, por lo tanto, una frecuencia de resonancia. Cuando la onda incidente coincide con la frecuencia del sistema, este vibra produciéndose una pérdida de energía por fricción interna, por amortiguamiento en la sujeción, y por efecto de compresión del aire en la cavidad.



La ecuación que controla la frecuencia de resonancia del panel membrana es:

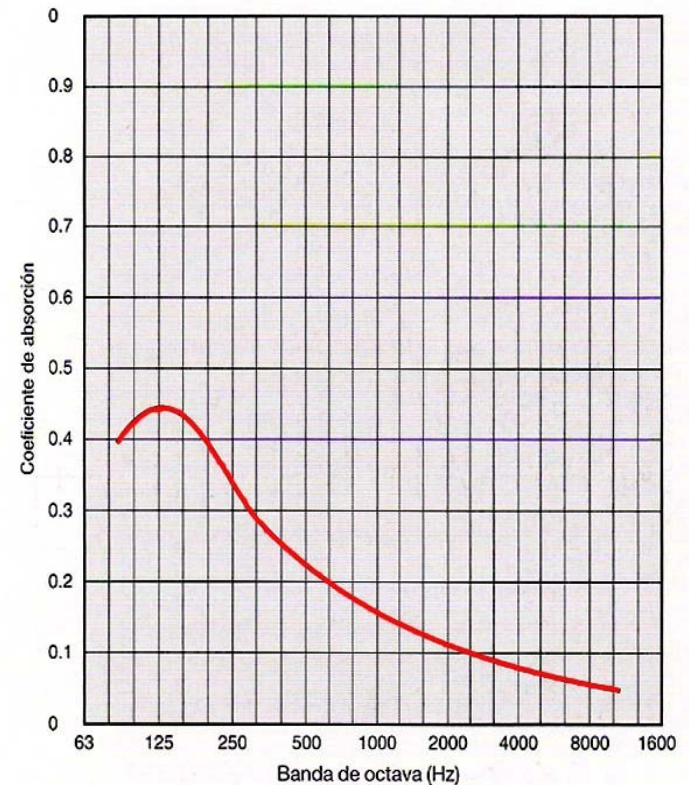
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}}$$

m: masa superficial membrana (Kg/m²)
d: distancia membrana-pared (m)

Esta expresión puede considerarse válida para espesores del panel de hasta 20mm siempre que la distancia entre puntos o líneas de fijación no sea inferior a 80cm.

De todos modos, la fórmula da valores aproximados, pudiendo obtenerse diferencias en el montaje real.

El relleno de la cavidad con material absorbente puede variar la frecuencia de sintonía y la selectividad del resonador de membrana.

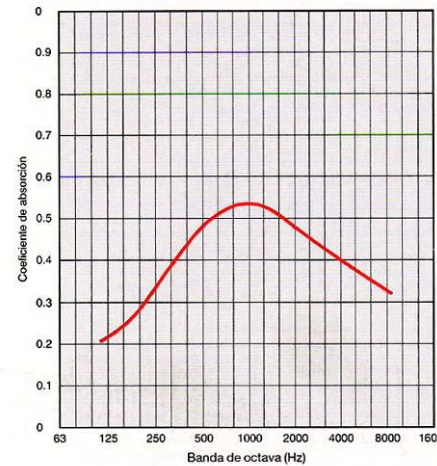
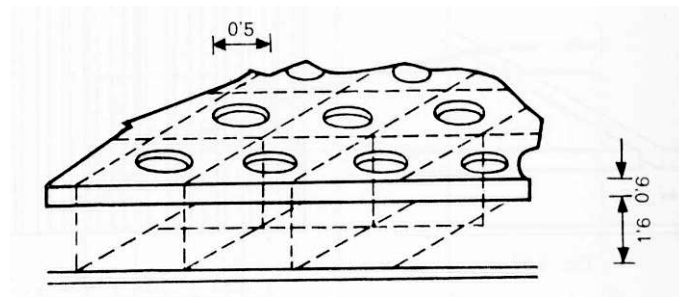


Ejemplos de materiales absorbentes tipo resonador de membrana

- Láminas de madera u otro material.
- Láminas de material absorbente.
- Ventanas o puertas de cristal (sobre todo ventanas de grandes dimensiones).
- En general, paneles que tengan la posibilidad de vibrar.

4- Paneles perforados (resonadores de Helmholtz)

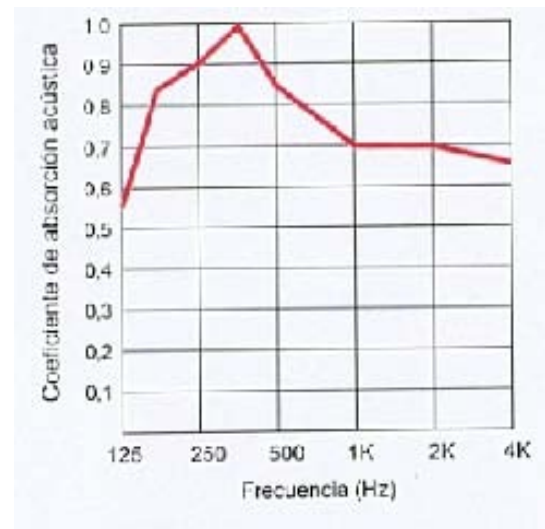
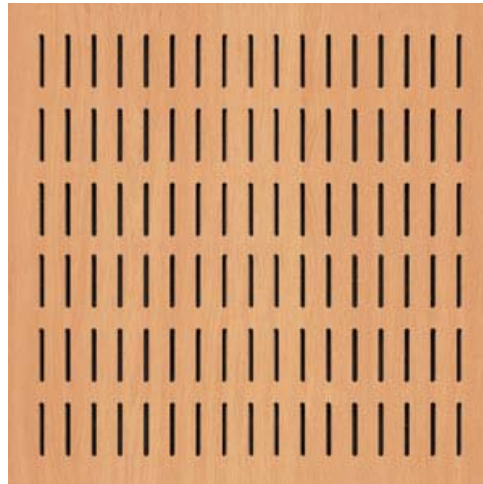
Se basan en placas con perforaciones (tasa perforación baja, inferior al 20%) que forman una cavidad con la pared rígida. La cavidad, generalmente, se rellena de material absorbente poroso.

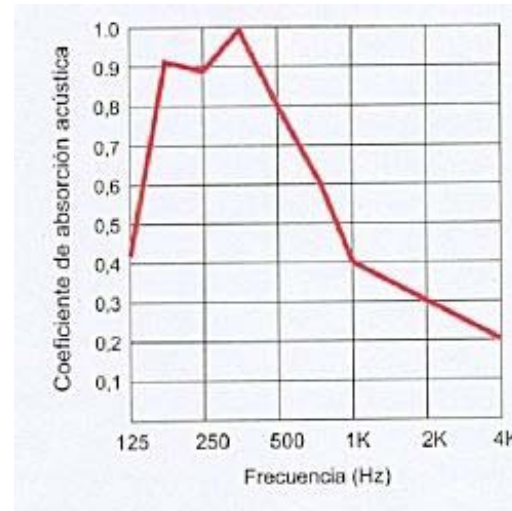
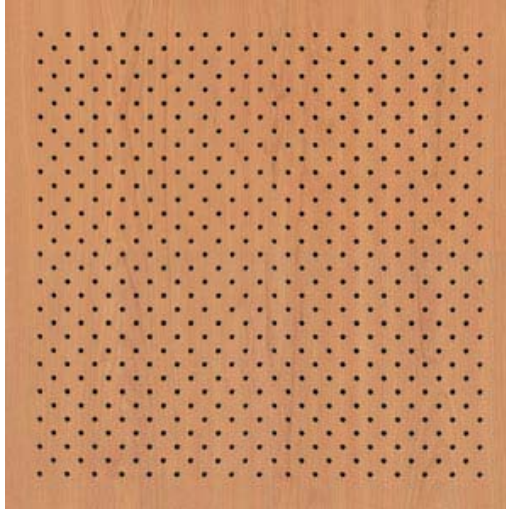


Las características acústicas variarán en función del espesor de la cámara de aire, del espesor del panel, del % de perforación y de si se coloca un material absorbente dentro de la cámara de aire.

Ejemplos de paneles perforados

Panel resonador perforado tipo ranura.





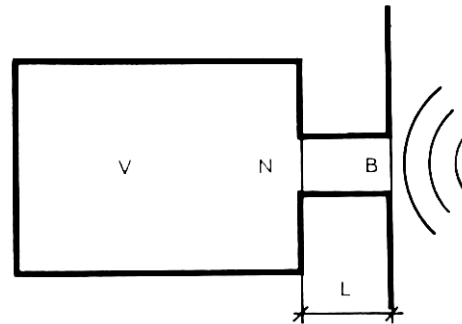
Estos elementos tienen una frecuencia de resonancia. Equivalen a un sistema mecánico

masa-muelle: la masa es la del aire dentro de la perforación de la placa que se mueve como un bloque, y el muelle es el aire dentro de la cavidad. Forman un conjunto de resonadores de Helmholtz. A continuación explicaremos qué es un **Resonador de Helmholtz**:

Resonador de Helmholtz

Se basa en una cavidad cerrada por paredes rígidas, de volumen V , que comunica con el exterior a través de un cuello de longitud L y de sección S .

Se comporta, bajo ciertas condiciones, como un sistema masa-muelle, presentando, por lo tanto, una frecuencia de resonancia.



Estudio del resonador de Helmholtz:

Si se cumple que la longitud de onda (λ) es superior a L ($\lambda \gg L$) el fluido del cuello se moverá como una unidad, constituyendo el elemento de *masa*. Si $\lambda \gg V^{1/3}$, la presión acústica dentro de la cavidad proporcionará el elemento de *rigidez*. Si $\lambda \gg S^{1/2}$, la apertura radiará sonido como una fuente simple y por lo tanto será el elemento de *resistencia*. En el cuello se dan pérdidas de tipo viscoso, adicionales, pero para cuellos de diámetro mayor a 1cm, estas pérdidas son, en general, menores que las asociadas con la radiación y pueden ignorarse.

El elemento de Masa:

El fluido de la masa del cuello tiene una masa efectiva total:

$$m = \rho_0 S L'$$

L' es la longitud efectiva del cuello, mayor a la longitud física real debido a la carga de su masa de radiación. Veamos a continuación el desarrollo teórico para la obtención de la longitud efectiva.

Longitud efectiva del cuello; Corrección de extremo:

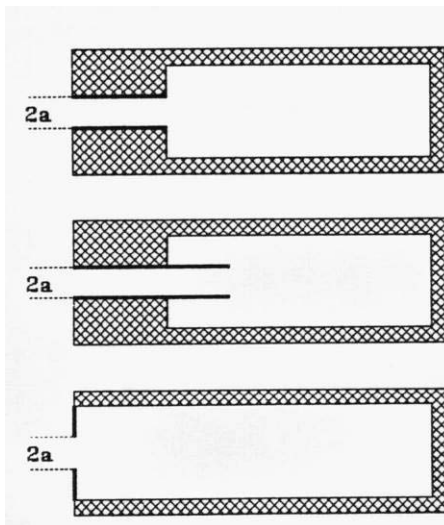
El término conocido como corrección de extremo nos lleva a corregir el valor de la longitud física del cuello de un resonador en función del radio de la boca u orificio del resonador.

El efecto extremo puede verse como una carga adicional al pistón que simbolizaría la masa de aire dentro del cuello. Esta carga tiene un volumen cilíndrico de fluido de área de sección transversal igual a la del pistón (cuello del resonador) y longitud o altura efectiva igual a $\frac{8a}{3\pi} \approx 0.85a$

Este valor es válido para el caso denominado “terminación con pestaña”, es decir, cuando una superficie grande (compara con la longitud de onda de la frecuencia de resonancia) acompaña la terminación física del cuello.

Cuando la terminación es “sin pestaña” la corrección adopta el valor de $0,6 \cdot a$.

Ejemplos de la aplicación de la corrección de extremo:



Terminación con pestaña por los dos extremos

$$L' = L + 2(0,85) \cdot a$$

Terminación con pestaña por un extremo

$$L' = L + (0,85 + 0,6) \cdot a$$

Terminación con pestaña en los dos extremos

$$L' = L + 2(0,85) \cdot a$$

El elemento de rigidez:

Al considerar la masa de aire del cuello como un pistón que sella el volumen interior, los movimientos del pistón (ξ) provocan cambios del volumen de la cavidad ($\Delta V = -S\xi$), a partir de la condensación s :

sabiendo:

$$s = \frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V} = \frac{S\xi}{V}$$

$$p = \rho_0 c^2 s = \frac{\rho_0 c^2 S}{V} \xi$$

La fuerza requerida para mantener el desplazamiento es: y, por tanto, (siguiendo la Ley de Hooke de un muelle e identificando términos, la rigidez efectiva es:

$$F = \frac{\rho_0 c^2 S^2}{V} \xi$$

$$K = \frac{\rho_0 c^2 S^2}{V}$$

El elemento de resistencia:

El fluido que se mueve en el cuello radia sonido en el medio circundante de la misma forma que el tubo con el extremo abierto. Para $\lambda \gg a$, la resistencia de radiación es:

$$R_r = \rho_0 c \frac{K^2 S^2}{2\pi} (\text{pestaña})$$

$$R_r = \rho_0 c \frac{K^2 S^2}{4\pi} (\text{sin pestaña})$$

La frecuencia de resonancia:

Cuando una onda sonora de amplitud P , con fuerza $P \cdot S$, incide sobre el resonador, la ecuación diferencial resultante para el desplazamiento (hacia dentro) del fluido del cuello es:

$$m \frac{d^2 \zeta}{dt^2} + R_r \frac{d\zeta}{dt} + K\zeta = SP e^{j\omega t}$$

Esta es la ecuación de un oscilador forzado, por analogía, la impedancia de un resonador de Helmholtz es:

$$Z_m = R_r + j\left(\omega m - \frac{K}{\omega}\right)$$

Así pues, la frecuencia de resonancia, dada en la condición de reactancia cero, es:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

Como puede apreciarse, la frecuencia de resonancia no depende de la forma de la cavidad del resonador. Mientras las dimensiones del resonador sea menores a la longitud de onda y la apertura no sea muy grande, la frecuencia viene determinada por el cociente $S/L'V$.

Es conveniente remarcar que esta formulación sirve para un resonador de sección de apertura circular, determinada por el radio a . Cuando la boca del resonador no es circular se suele trabajar con el radio equivalente a la sección dada:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

Efecto de rellenar la cavidad con material absorbente:

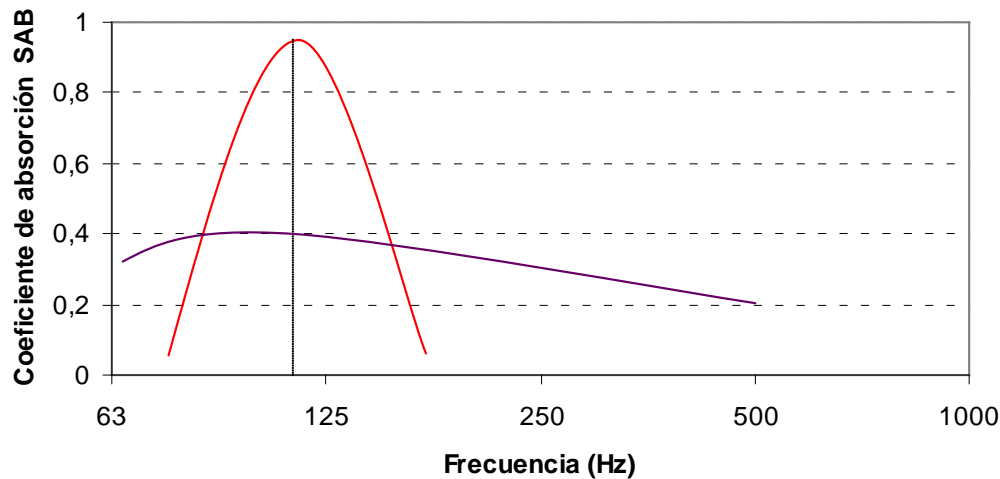
Cuando colocamos material absorbente poroso (lanas minerales...etc) en la cavidad de un resonador, estamos introduciendo pérdidas en el sistema, estamos amortiguando el sistema.

EL efecto se traduce en una respuesta menos selectiva y menos efectiva a la frecuencia de resonancia, y en un aumento del ancho de banda de actuación (respuesta más amplia en frecuencia).

Además, la frecuencia de resonancia disminuye, debido a un aumento aparente (no real) de la cavidad debido al absorbente.

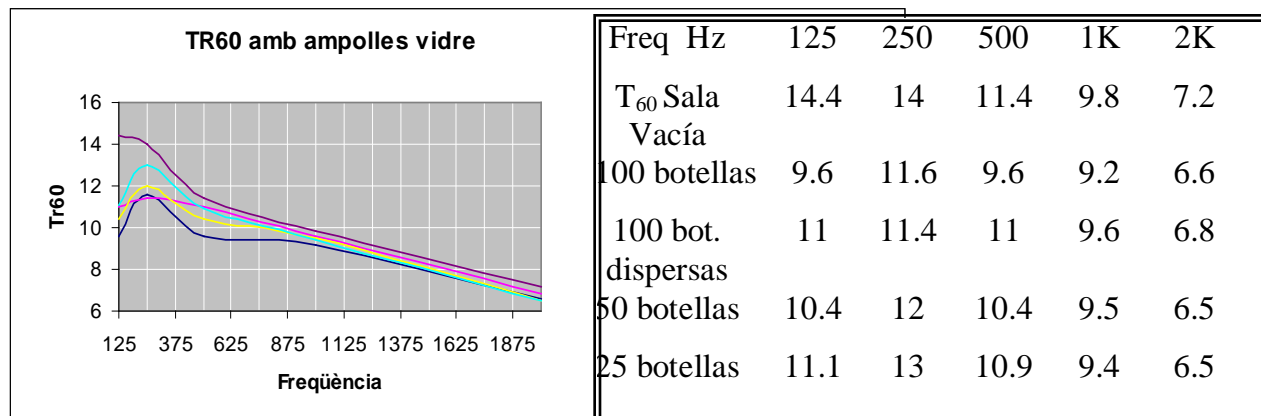
Según datos de Beranek y otras realizadas en esta Universidad, para resonadores individuales, la disminución de la frecuencia puede llegar hasta un 85%. Para paneles perforados o conjuntos de resonadores, el efecto del absorbente puede ser más significativo, en cuanto a variación de la frecuencia de resonancia del sistema no amortiguado.

Coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad con y sin absorbente:

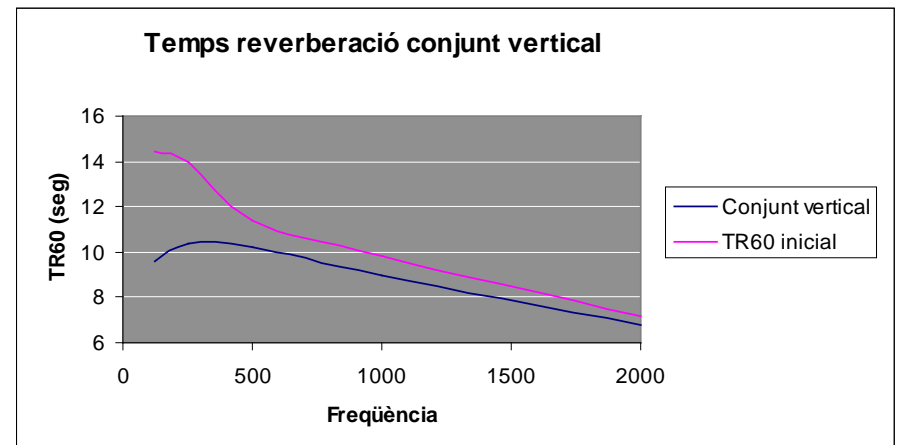
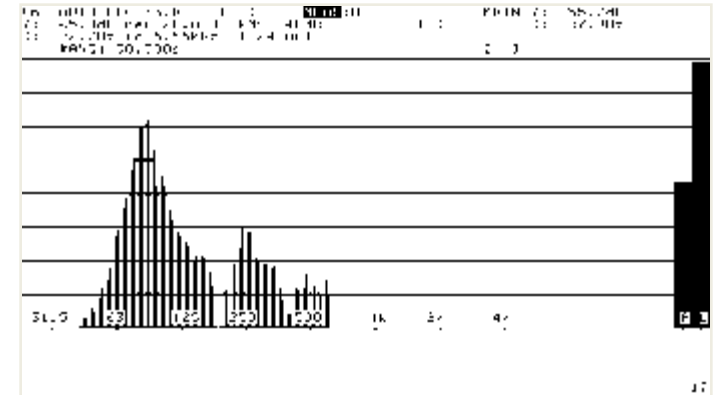
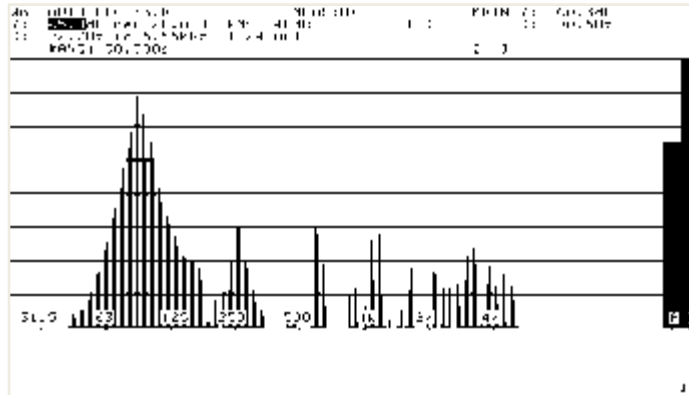


Experimento realizado en la cámara reverberante de la universidad para estudiar la absorción de un grupo de resonadores de Helmholtz (botellas) de frecuencia de resonancia igual a 116 Hz.

Las 100 botellas, dentro de la banda de octava en la que actúan, pueden llegar a provocar una descenso de casi 5 segundos !

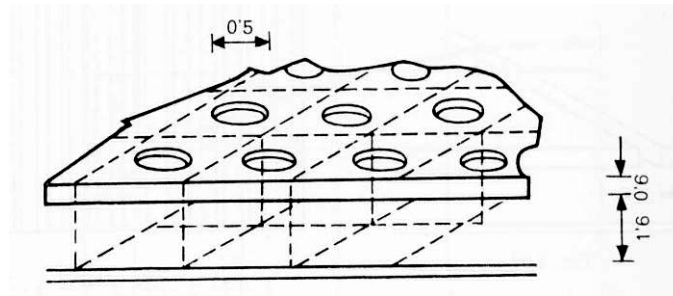


•Conjuntos de resonadores



- **Diseño de paneles perforados basados en el resonador de Helmholtz:**

- Un panel perforado consiste en un conjunto de resonadores de Helmholtz que están compartiendo un volumen global.



- A partir de la expresión de la frecuencia de resonancia del resonador individual, podemos deducir la de estos elementos en función de la porosidad del panel (P):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{\text{agujero}} \cdot n_{\text{agujeros}}^o}{L' \cdot d \cdot S_{\text{panel}}}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L' \cdot d}}$$

Identificando los términos de esta expresión:

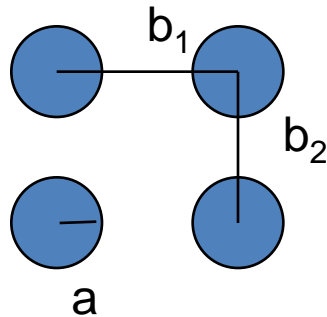
P: porosidad del panel =superficie de poro (agujero) / superficie total

d: distancia interior del panel a la pared

L': espesor del panel corregida (longitud del cuello del resonador con la corrección de extremo)

c: velocidad del sonido (en función de la temperatura. A 20°C = 343 m/s)

Cómo calculamos la porosidad? Ejemplo:


$$P = \frac{\pi a^2}{b_1 b_2}$$

Debido al efecto de acoplamiento entre los diferentes orificios, el panel perforado (o ranurado) es menos selectivo que el resonador individual; su curva de absorción es menos puntiaguda y más amplia.

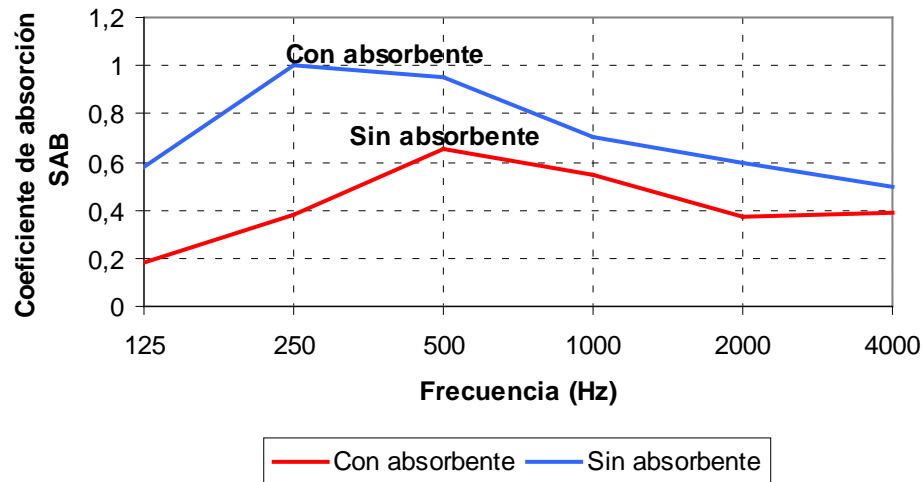
Influencia del material absorbente en la cavidad:

La absorción del panel aumenta cuando se rellena la cavidad (parcial o totalmente) con material absorbente poroso. Como en el resonador individual, el absorbente provoca una disminución de la frecuencia de resonancia debido a un aumento aparente del volumen, aunque en este caso, esta disminución puede ser mucho más significativa.

Es aconsejable colocar material absorbente en la cavidad. Según se coloque el material pegado al panel o pegado a la pared, la curva de absorción pasa de ser menor selectiva a más selectiva, respectivamente.

Ejemplo: absorción de un resonador múltiple, formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado en un 18% y separado de una pared rígida una distancia de 100 mm.

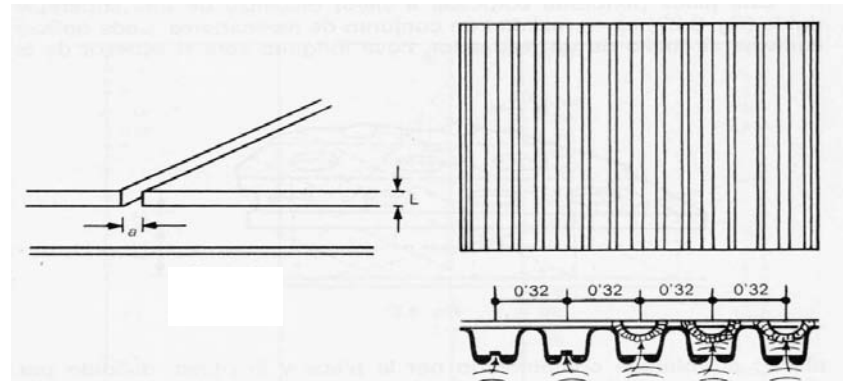
Se presentan dos curvas: una corresponde al resonador sin absorbente en la cavidad y la otra pertenece al mismo resonador pero con lana de vidrio de 80 mm de espesor en dicha cavidad. La frecuencia teórica del resonador sin absorbente es de 550 Hz.



Otros absorbentes basados en Helmholtz:

Resonadores lineales

Son paneles perforados con perforaciones en forma de ranuras tal como se muestra en la figura:

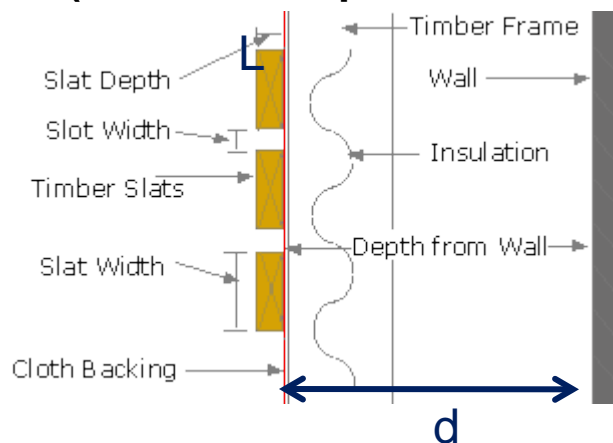


La fórmula para calcular la frecuencia de sintonía es:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

donde S: suma de las secciones transversales de las zonas entre listones ocupada por aire (cm²). L: espesor de un listón (cm), V: volumen de la cavidad (cm³)

Otros absorbentes basados en Helmholtz: Resonadores lineales (Cuando comparten volumen)



$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

$$V = Sp / d$$

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{L'd}}$$

La fórmula para calcular la frecuencia de resonancia es:

donde:

p: es la perforación $p = S1/S2$, siendo S1 el área de apertura y S2 el área opaca del resonador

L': espesor efectivo de un listón (cm) $L' = 1,2xD$ (D o L, que es el espesor real).

d: espesor cavidad de aire

Sp: superficie de los listones + superficie de la zona entre listones

$$p = \frac{S}{S_p} = \frac{r}{r + w}$$

Otros absorbentes basados en Helmholtz: Resonadores lineales (Cuando comparten volumen)

Sugerencia: Si los resonadores son montados verticalmente es recomendado que tengan un acabado con color oscuro parecido al de la sombras de los agujeros para evitar el efecto óptico llamado “picket fence”.

Ejercicio:

Espesor láminas: 10mm (D o L)

Anchura láminas: 60mm (w)

Anchura agujeros: 10 mm (r)

Espesor cavidad de aire: 50mm (d)

Solución: $f_0 = 847\text{Hz}$.

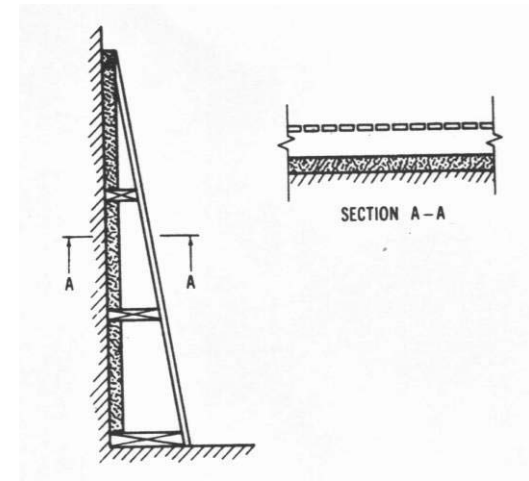


Multiresonadores:

No son elementos dedicados a una sola frecuencia de resonancia. Pueden sintonizarse a varias frecuencias discretas (jugando, por ejemplo, con varios diámetros de perforación) o dentro de un margen frecuencia más o menos amplio (jugando con volúmenes variables).

Slat type

El *slat type* es un ejemplo de multiresonador basado en un panel perforado, generalmente lineal, que se coloca inclinado frente a la pared con la que forma la cavidad. De esta forma, creamos una variable; la distancia d del panel a la pared, y, por lo tanto, una frecuencia de resonancia variable entre la d_{max} y la $d_{\text{mín}}$.



• Los multiresonadores lineales del Philharmonie de Berlin:

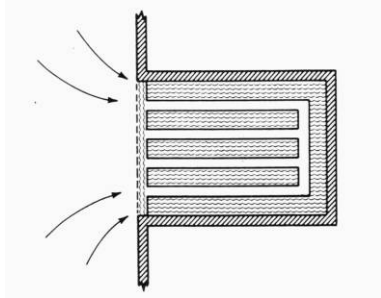


Nultiresonadores con perforaciones de diámetros variables:

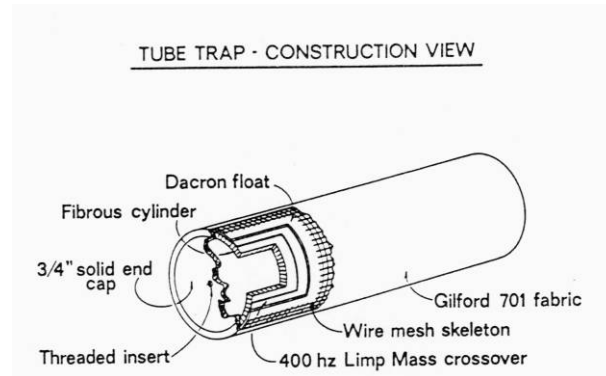
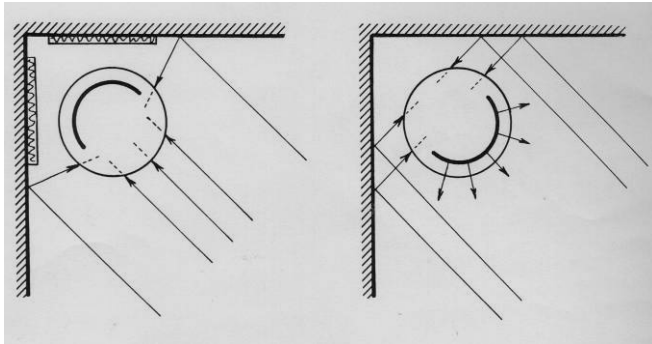


Otro tipo de absorbentes de baja frecuencia: Bass Traps

Son elementos que intentan “atrapar” la onda sonora entre sus cavidades recubiertas de material absorbente. Son diseños poco teóricos, intuitivos y muy empíricos. Ejemplos: Tube trap, Corner trap, $\lambda/4$ trap , etc.



$\lambda/4$ trap: Requiere de mucho espacio si pretende usarse para la baja frecuencia. Se basa en crear caminos recubiertos de absorbente y de longitud $\lambda/4$, para optimizar la absorción y cancelación de las ondas por distancia recorrida.



Tube trap: Cilindro que suele colocarse en esquinas, con una parte reflectante y relleno de absorbente.

Índices indicadores de absorción

Noise Reduction Class: NRC

Es una forma de expresar la absorción de un material a partir de un único valor. Este coeficiente global es usado, generalmente, en países norteamericanos.

El valor global se obtiene como media aritmética de los coeficientes desde 250 hasta 2KHz:

$$NRC = \frac{\alpha(250Hz) + \alpha(500Hz) + \alpha(1KHz) + \alpha(2KHz)}{4}$$

Es peligroso tratar sólo con valores globales, puesto que se pierde la información frecuencial, en este caso de obvia el comportamiento a 125Hz y puede llevar a errores o problemas. Siempre es recomendable tener o exigir las características completas.

α_p - Coeficiente de absorción sonora práctico

Valor del coeficiente de absorción acústica dependiente de la frecuencia, basado en mediciones por bandas de un tercio de octava de acuerdo con la norma ISO 354, y calculado por bandas de octava según la fórmula siguiente:

$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3}}{3}$$

donde:

- α_{pi} es el coeficiente de absorción sonora práctico para la banda de octava i;
- α_{i1} , α_{i2} y α_{i3} , son los coeficientes de absorción acústica de las bandas de tercio de octava dentro de la octava i

α_w - Coeficiente de absorción acústica ponderado según UNE EN ISO 11654

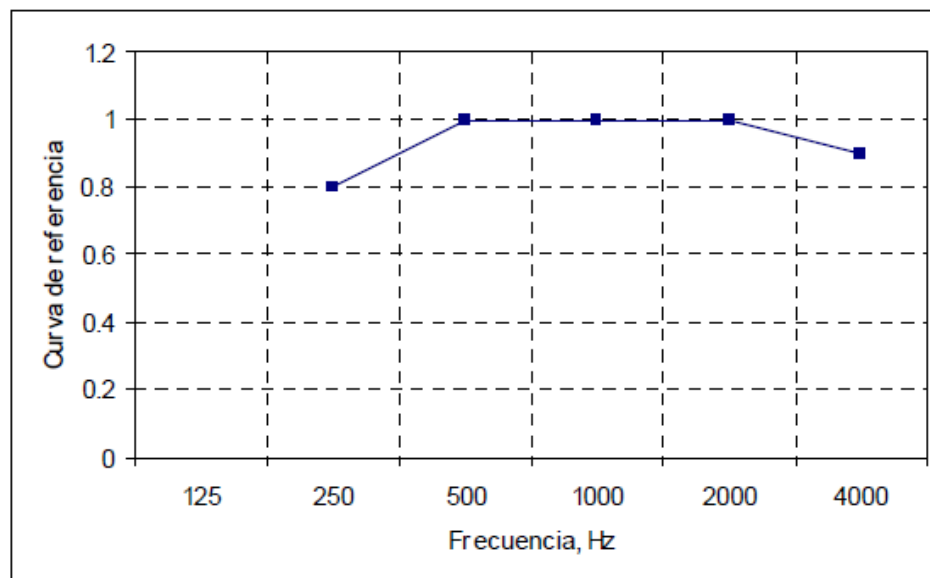
Valor único independiente de la frecuencia, igual al valor de la curva de referencia a 500Hz después de desplazarla, tal y como se indica a continuación.

Se realiza una traslación de la curva de referencia por pasos de 0,05 hacia la curva de valores del coeficiente de absorción sonora práctico, hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea menor o igual que 0,10. Se produce una desviación desfavorable a una frecuencia concreta cuando el valor medido es menor que el valor de la curva de referencia.

Deben tenerse en cuenta solamente las desviaciones en el sentido desfavorable. La absorción acústica ponderada a , se define como el valor de la curva de referencia una vez desplazada a la frecuencia de 500 Hz. En la tabla siguiente se dan los valores originales de la curva de referencia:

α_w - Coeficiente de absorción acústica ponderado según la UNE EN ISO 11654

Frecuencia (Hz)	Valor curva de referencia
250	0.80
500	1.00
1000	1.00
2000	1.00
4000	0.90



Clase de absorción acústica	α_w
A	0.90; 0.95; 1.00
B	0.80; 0.85
C	0.60; 0.65; 0.70; 0.75
D	0.30; 0.35; 0.40; 0.45; 0.50; 0.55
E	0.15; 0.20; 0.25
Sin clasificar	0.00; 0.05; 0.10