

4 Reflexión y Absorción

Curso de Acondicionamiento Acústico

Facultad de Arquitectura UDELAR

Arq. Ricardo Estellés Díaz

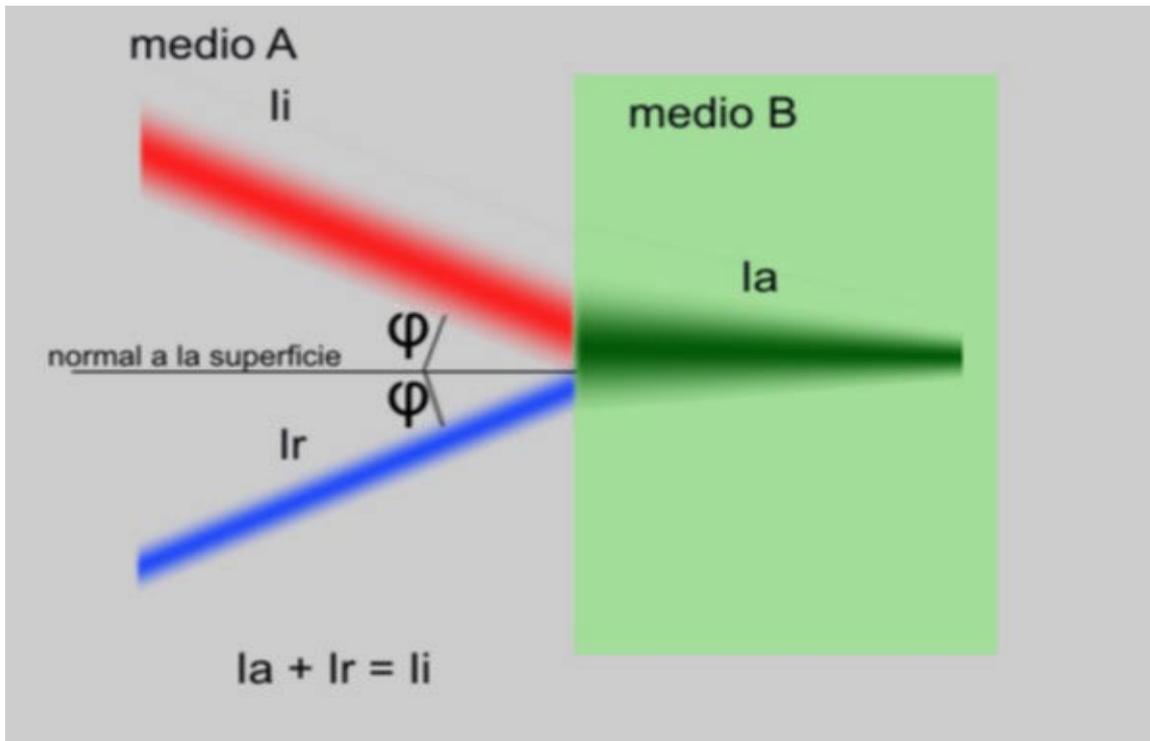
Profesor Titular del Curso de Acondicionamiento Acústico

2010

REFLEXIÓN

Las ondas sonoras al propagarse generalmente encuentran obstáculos materiales que se oponen a su propagación.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie de discontinuidad entre dos medios (A y B) no adaptados, tales como por ejemplo, aire y hormigón ...



... se produce un fenómeno físico en que:

una parte de la energía incidente (I_i), se refleja sobre el medio A (I_r) otra parte pasa al medio B (I_a), prosiguiendo su propagación por este medio.

Entonces tenemos que $I_i = I_r + I_a$ si dividimos por I_i $\therefore 1 = I_r / I_i + I_a / I_i$

$I_r / I_i = r$ índice o coeficiente de reflexión

$I_a / I_i = a$ índice o coeficiente de absorción

$$r + a = 1$$

$$1 \geq r \geq 0 \therefore 1 \geq a \geq 0$$

Tanto a como r son coeficientes numéricos adimensionales

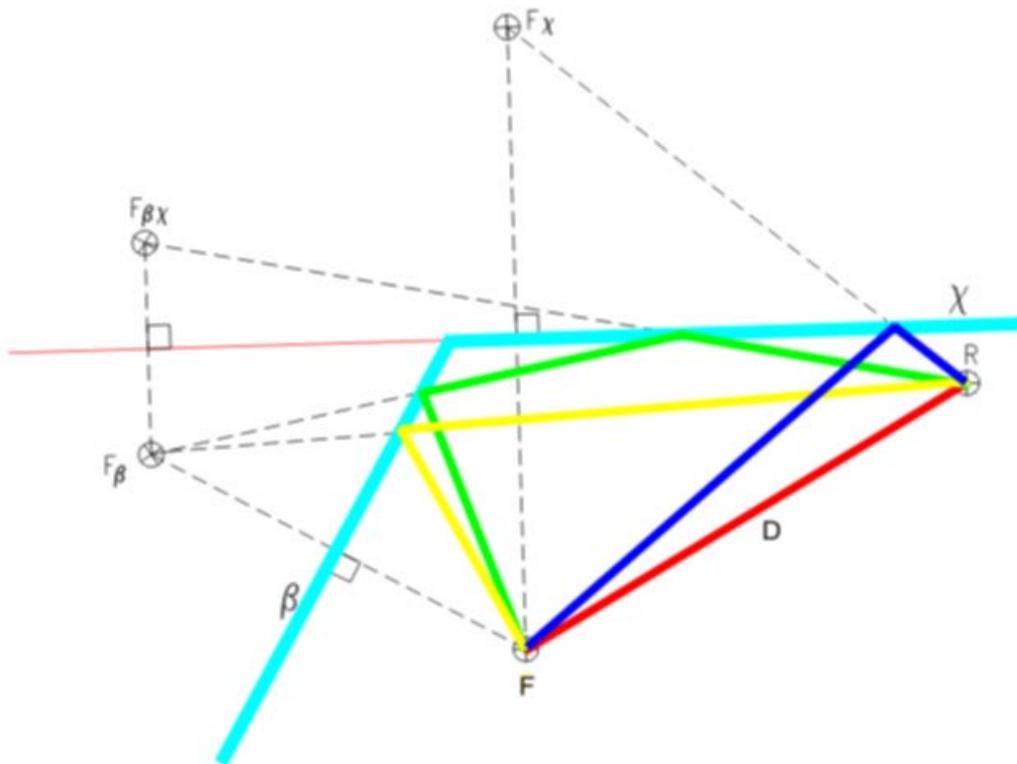
La reflexión y la absorción son dos aspectos del mismo fenómeno

El sonido sigue las mismas reglas de la reflexión que la luz.

El rayo incidente, la normal a la superficie de reflexión y el rayo reflejado, se encuentran en un mismo plano.

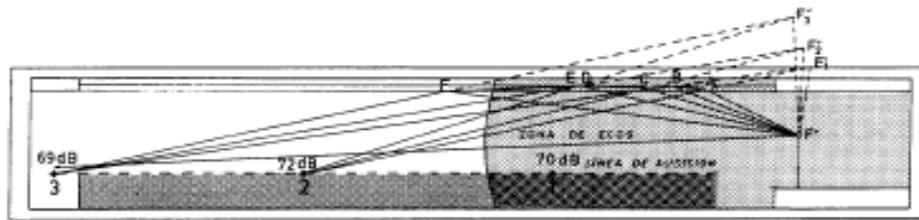
El ángulo ϕ de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Una fuente sonora, F (puntual y adireccional), colocada frente a un plano reflejante, b produce un foco virtual reflejado F_b que se encuentra en la misma normal al plano y a igual distancia de este.

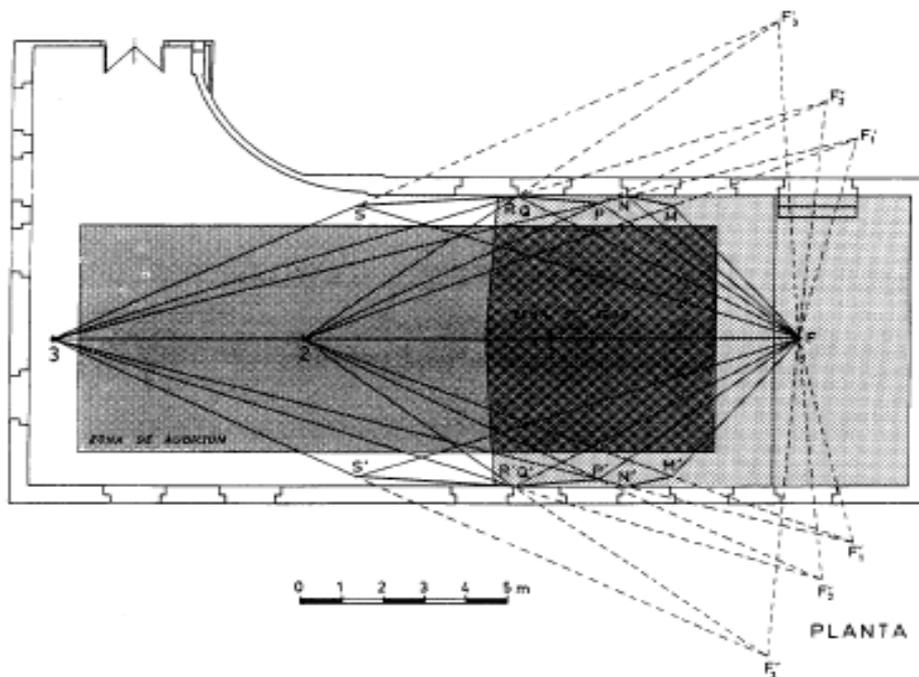


Reflexiones múltiples

- Cada fuente, F , ubicada en el interior de un espacio arquitectónico tendrá su correspondiente imagen reflejada F_b, F_c, \dots, F_1 en cada uno de los planos, determinados por los cerramientos. A su vez, cada fuente imagen F_b, F_c, \dots, F_1 se reflejará en los mismos planos, dando lugar a múltiples reflexiones, (segundas reflexiones, terceras reflexiones, etc.)
- El estudio mediante los recursos de la acústica gráfica, tienen dos aspectos básicos, uno es el estudio del recorrido de rayos, ya visto y el otro es el del estudio de los frentes de onda, donde se estudia para determinados instantes donde se encuentran los frentes de ondas directos y reflejados.



ALZADO



Ejemplo de estudio gráfico de un sala paralelepípedica. (En la actualidad se realiza por simulación asistida por ordenador)

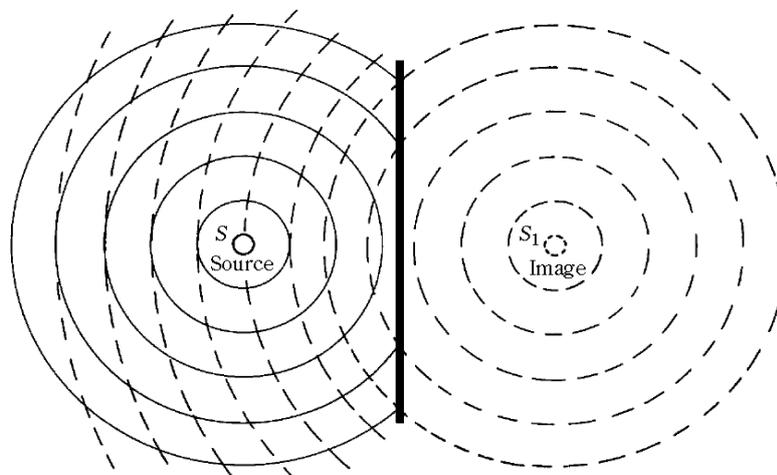
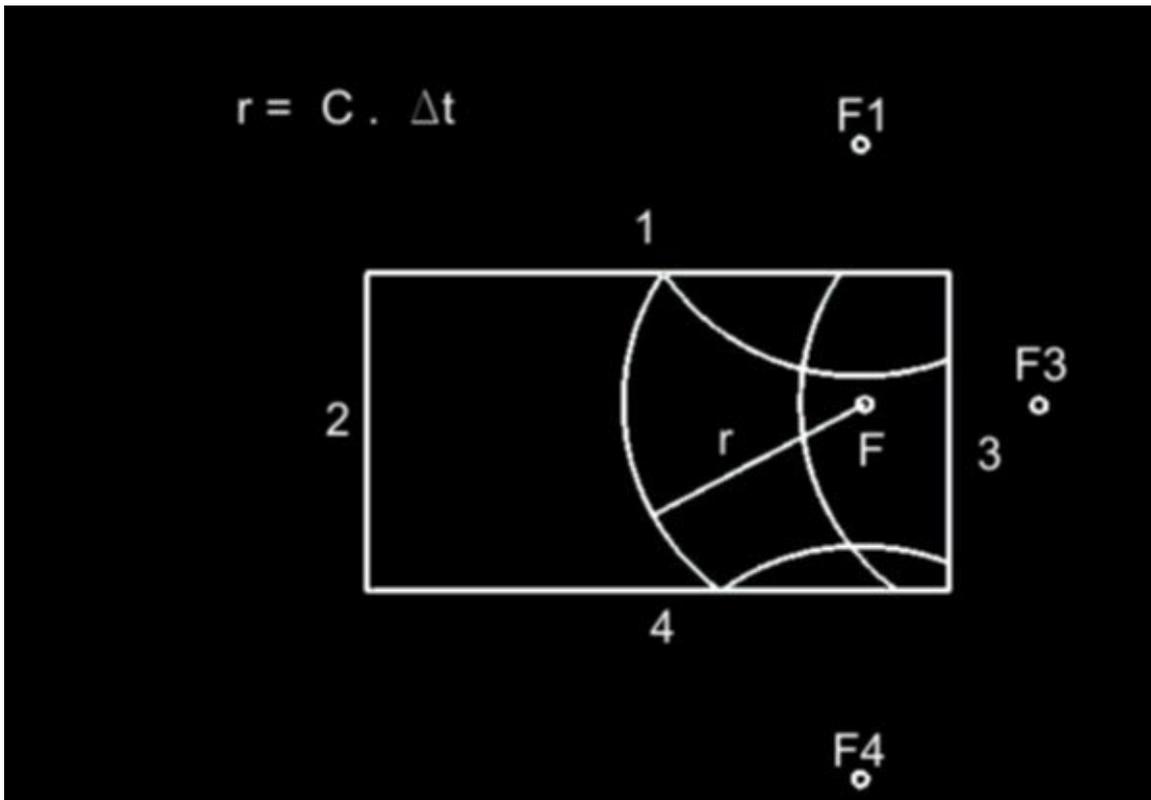
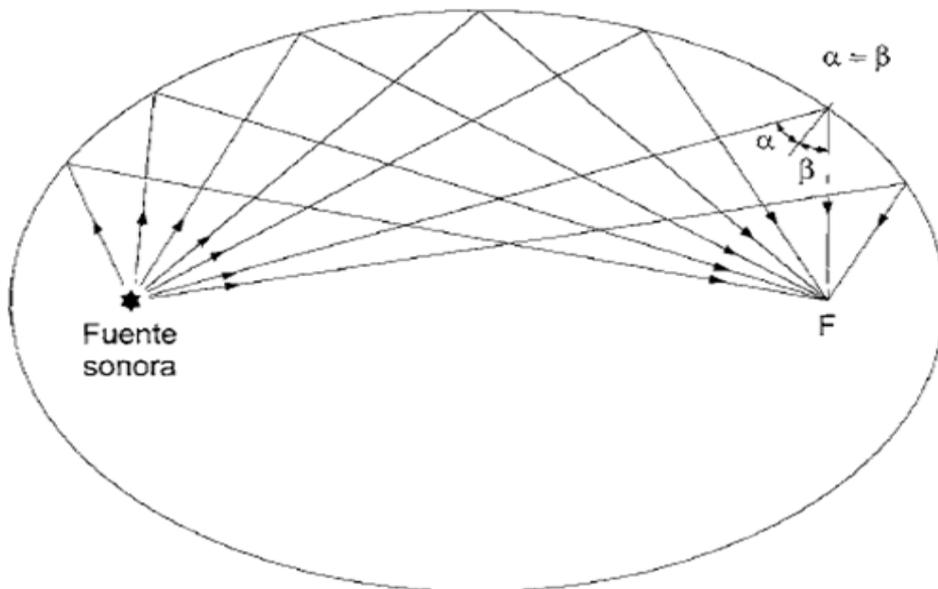


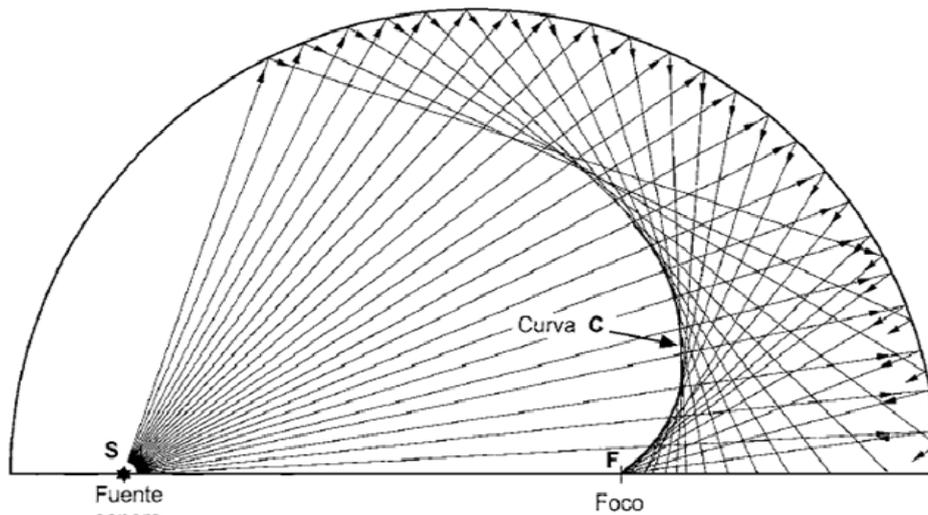
Imagen reflejada de frentes de onda producidos por una fuente puntual S



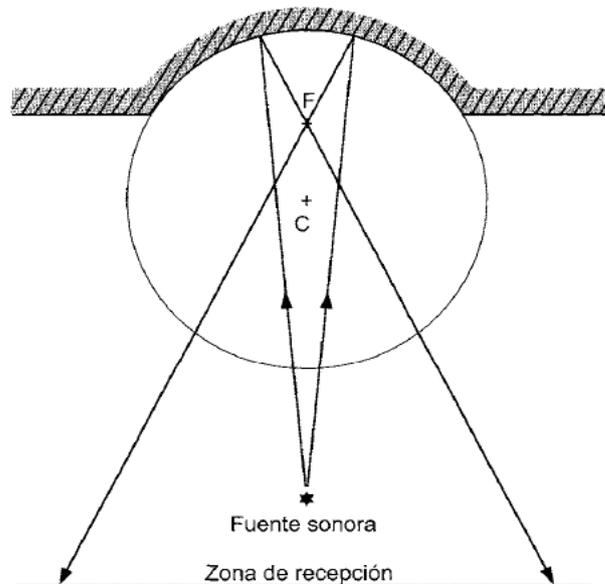
Imágenes de los frentes de onda directos y reflejados producidos por una fuente sonora puntual F y sus reflejadas por los cerramientos 1, 3 y 4



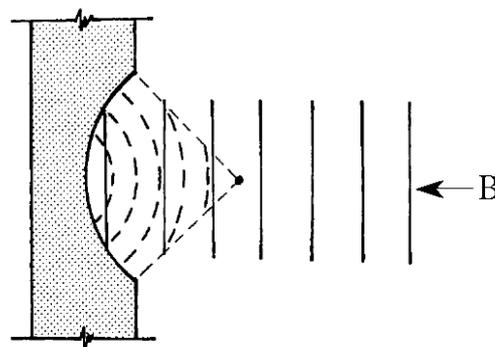
Focalizaciones producidas por una planta de forma elíptica, muestra como se produce una acumulación de energía acústica en F, en detrimento de otros puntos. (En general se considera un defecto acústico)



Focalizaciones producidas por una cubierta de forma semicilíndrica, las mismas se producen tanto en el punto F como en todos los puntos pertenecientes a la curva C.

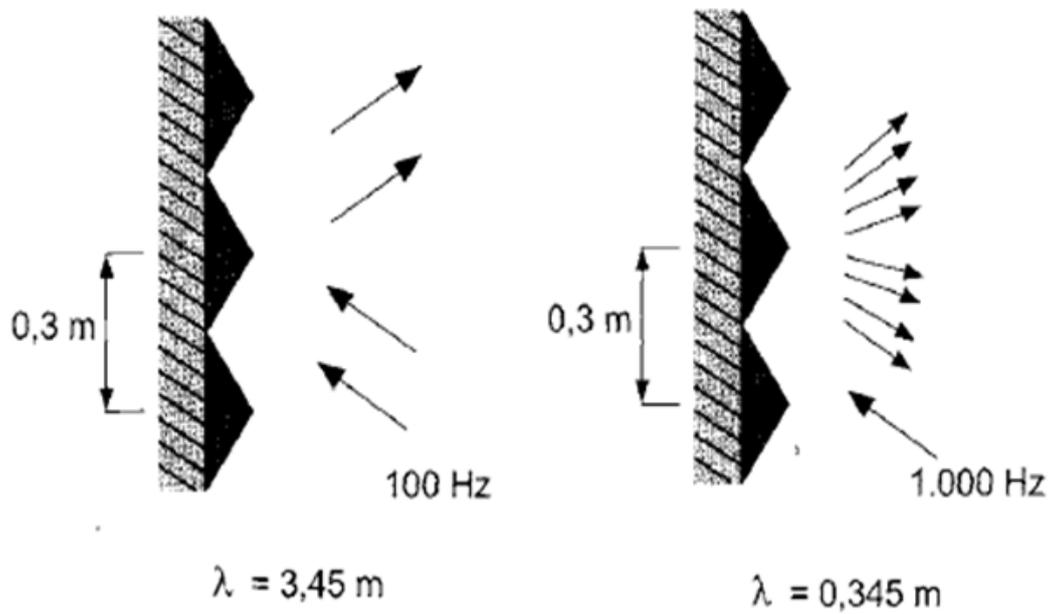


Utilización de las curvas de revolución para privilegiar las reflexiones de una fuente sonora en una zona de audiencia, produciendo ondas planas que presentan menor dispersión que las esféricas.



Recurso utilizado en templos para enfatizar la voz del orador principal.

Pared rígida



Ejemplos de dispersión de las ondas sonoras producida por reflexiones en superficies facetadas, su efecto resulta variable según la longitud de onda incidente en relación con el tamaño de las irregularidades.

Cerramientos que presentan una textura rugosa a la luz, son perfectamente planos (especulares) para las ondas sonoras.

ABSORCIÓN

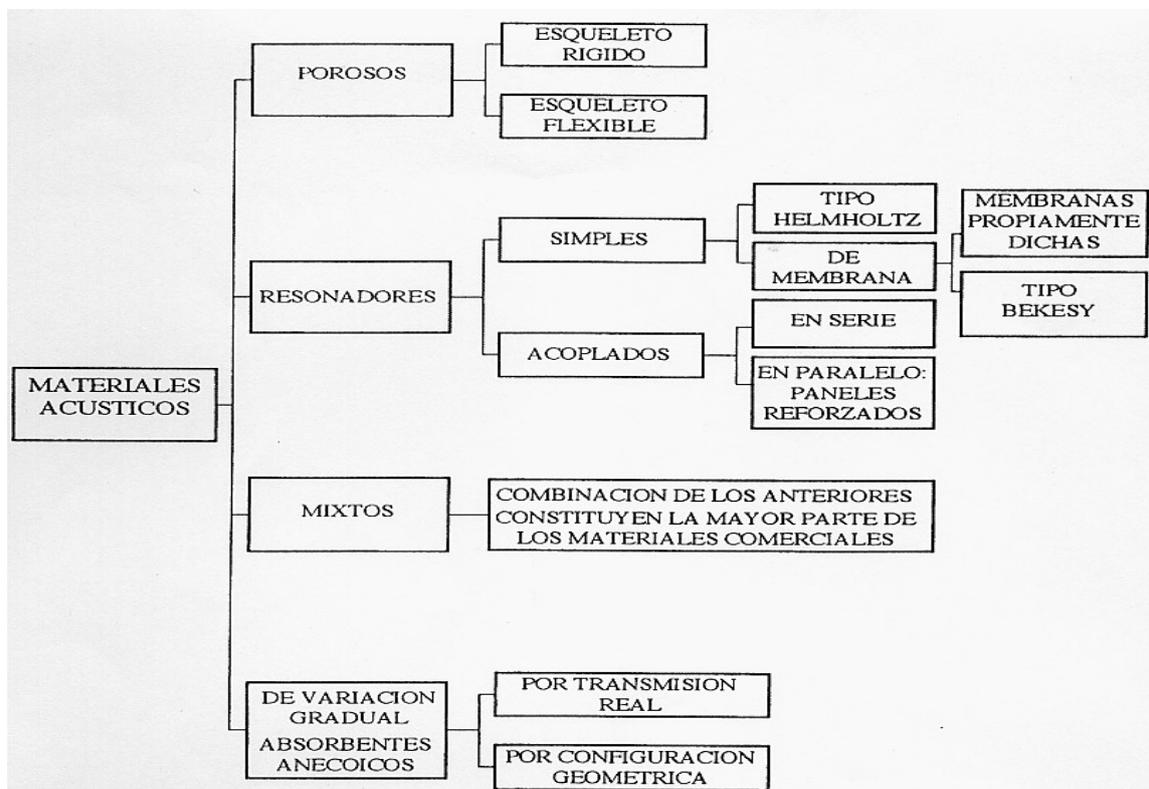
Cada material utilizado en la construcción tiene su correspondiente coeficiente de absorción sonora, a que se determina mediante procedimientos estrictos de acuerdo a la **Norma ISO 354**, de forma que los datos producidos en los ensayos de un laboratorio puedan ser utilizados en cualquier parte del mundo.

La absorción, **A** de un determinado material está determinada por el producto del coeficiente de absorción acústica, a por el área, **S** del material expuesto al sonido.

Entonces $A = S \cdot a$

La absorción se expresa en **Sabines** que dimensionalmente son iguales a m^2

Mecanismos de Absorción



En general los mecanismos de absorción están vinculados a formas de transformación de la energía cinética de las partículas, por las cuales se propaga el sonido, en calor, debido al rozamiento con las partículas del material absorbente.

No obstante lo anterior, la cadena de fenómenos a través de la cual se realiza esa transformación, es diferente en cada tipo.

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 la onda incide sobre la superficie. Ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen dar los mismos a las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz.

Las pérdidas de energía acústica en los materiales se pueden caracterizar mediante el coeficiente de absorción acústica α , entendiéndose por tal α la relación entre la energía acústica absorbida por un material y la energía acústica incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y que puede variar desde un 1 ó 2 % al 100 %, para diferentes materiales, en el primer caso la reflexión es total y en segundo lo es la absorción.

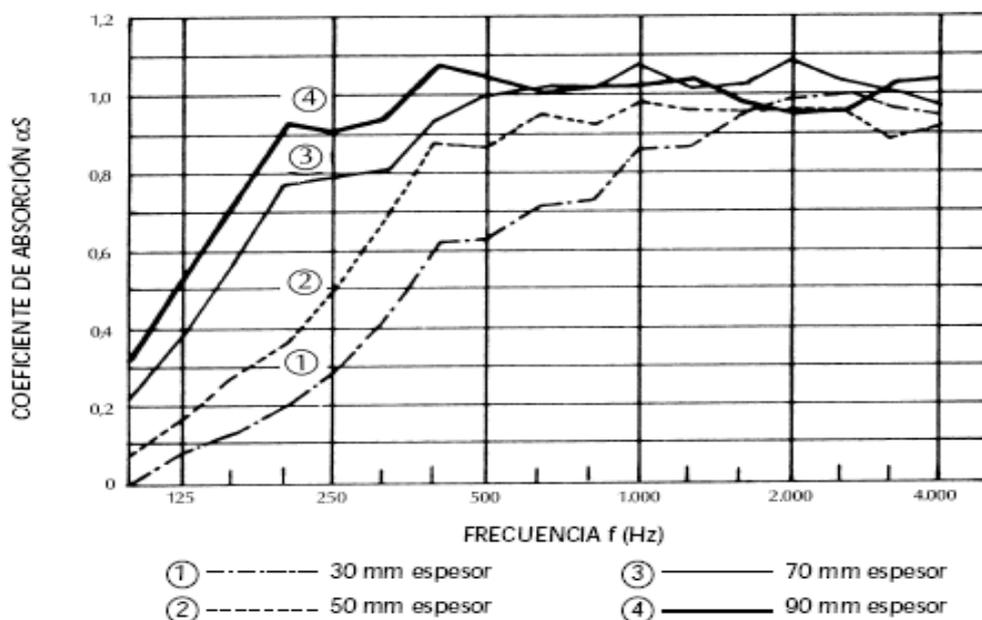
Materiales Porosos

Se trata de materiales formados por fibras o por estructuras cavernosas que dejan entre sí espacios que son alcanzados por las moléculas de aire

Actúan por rozamiento de las moléculas de aire con las del material, produciendo la disipación de la energía de las ondas sonoras que se transforma en calor.

El máximo de eficacia ocurre a altas frecuencias donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados. Los parámetros físicos que controlan el proceso de absorción son:

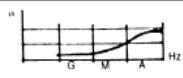
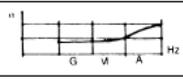
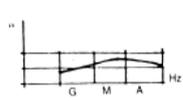
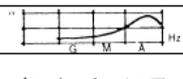
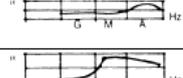
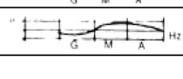
- Espesor de la capa del material
- La frecuencia del sonido
- El método de montaje
- La resistencia al paso del flujo del aire
- La porosidad
- El factor de estructura



Absorción acústica de paneles de lana de roca de densidad 70 kg/m^3 apoyados sobre una superficie rígida

Tipos de Materiales porosos:

- Mantas de fibra de vidrio o lana de roca
- Fieltros
- Productos de spray
- Yesos acústicos
- Ciertos tipos de baldosas acústicas
- Otros

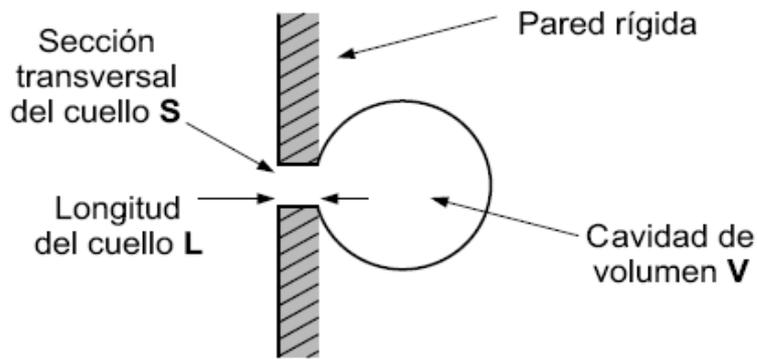
NATURALEZA	ASPECTO	FORMA DE COLOCACIÓN	PROCESO DE ABSORCIÓN	VALOR ACÚSTICO RELATIVO	OBSERVACIONES
Placas de fibras minerales comprimidas. • Lana de roca. • Lana de vidrio.	Placas rígidas con superficie uniforme o fisurada o ranurada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad de las placas.		Estos materiales son imputrescibles y no combustibles. Pueden encolarse sobre paramentos verticales. No es conveniente pintar estas placas, salvo, eventualmente, con pintura al agua que no tape los poros.
		Suspendidas.	Al efecto de porosidad se añade un efecto de diafragma que aumenta la absorción de los graves.		
Placas de fibras minerales poco comprimidas con una lamina plástica. • Lana de vidrio.	Placas semirrígidas autoportantes.	Suspendidas.	La absorción es debida a la porosidad y al efecto diafragma de la placa suspendida. La película plástica modera la absorción de los agudos en favor de los medios.		Estos materiales son interesantes por su poder absorbente casi uniforme. Imputrescible y no combustible.
Placas de fibras vegetales comprimidas. • Fibra de madera. • Fibra de caña de azúcar. • Paja, caña.	Superficie uniforme fisurada, estriada, ranurada o perforada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad.		Es un material combustible. Es conveniente no pintarlas. Pueden encolarse sobre paramentos verticales.
		Suspendidas.	La absorción es debida a la porosidad y al efecto de diafragma.		
Placas de fibras de madera	Fibras de madera aglomeradas con cemento. El aspecto es poco decorativo si queda a cara vista.	Encoladas o clavadas.	La absorción es debida a los grandes poros del material.		El poder absorbente aumenta con el espesor. Solo pueden aplicarse sobre paramentos planos. Es un material combustible.
		Suspendidas.	La absorción aumenta por el efecto de diafragma.		
Enrejados o tejidos.		Suspendidos o fijados sobre armadura.	Se obtiene el resultado que corresponde al material que recubren. Una placa de lana de vidrio colocada sobre un tejido de gran malla da el resultado de la lana de vidrio.		Pueden ser colocados en revestimientos de muros con materiales combustibles, pero pueden ignifugarse.

En estos materiales los coeficientes de absorción son sensiblemente superiores para las altas frecuencias que para las frecuencias graves. Pudiéndose mejorar esta característica aumentando el espesor del material absorbente.

Resonadores de Helmholtz

El aire del cuello se mueve como una unidad, y constituye el elemento de masa, mientras que el aire de la cavidad se comporta como un resorte, constituyendo el elemento de rigidez. La masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad dan lugar a un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 , las paredes del resonador ofician de amortiguador de las vibraciones por rozamiento.

El valor del coeficiente de absorción es muy elevado pero se extiende sobre una banda de frecuencias muy estrecha cercana a f_0 , es decir es muy selectivo.



El máximo de absorción ocurre a la frecuencia de resonancia f_0 , dada por la expresión:

$$f_0 = 5480 / \sqrt{S / l \cdot V}$$

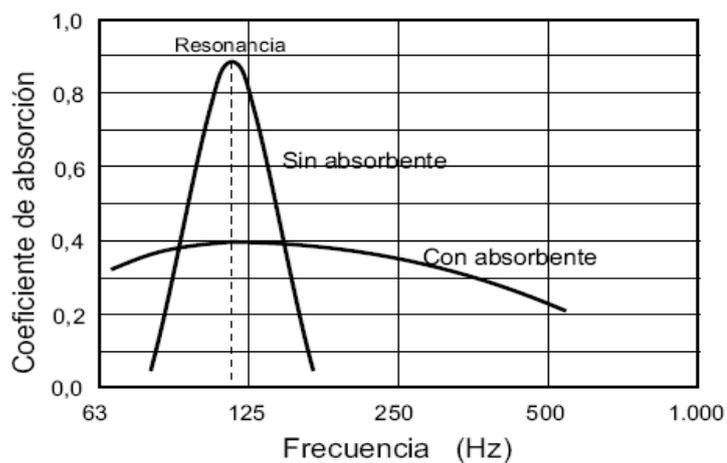
donde:

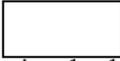
f_0 = frecuencia de resonancia del resonador (Hz)

S = sección transversal del cuello (cm^2)

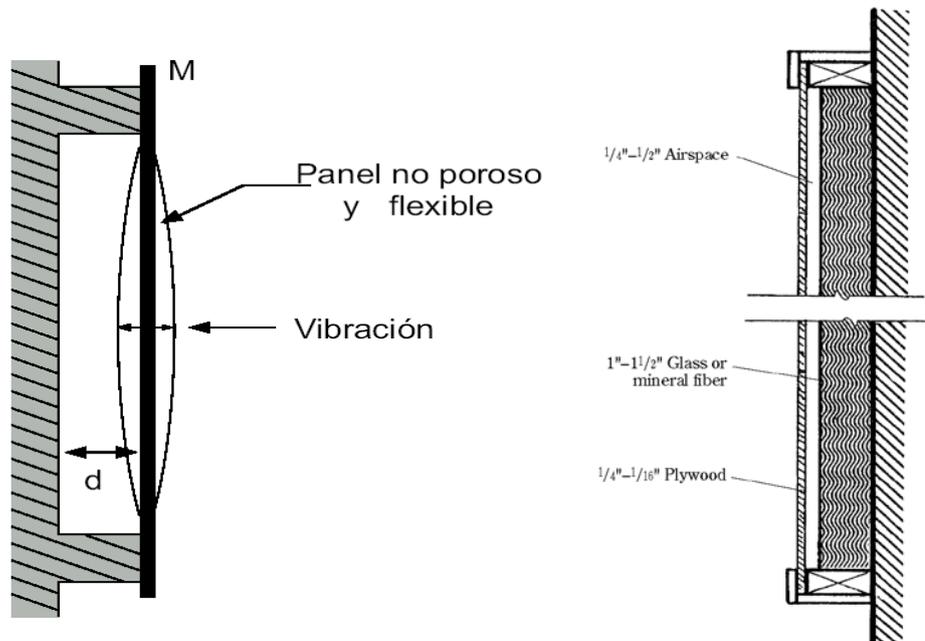
l = longitud del cuello (cm)

V = volumen de la cavidad (cm^3)



 Coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad (Helmholtz) con y sin absorbente en la cavidad

Membranas resonadoras



Convierten la energía sonora en mecánica como resultado de las deformaciones ondulatorias de un panel al ser excitado por el sonido incidente, la onda sonora transmite a la placa la vibración la cual por rozamiento interno de sus partículas disipa la energía vibratoria.

El máximo de absorción ocurre en la región de las bajas frecuencias y para la frecuencia de resonancia f_0 .

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \quad (\text{en Hz})$$

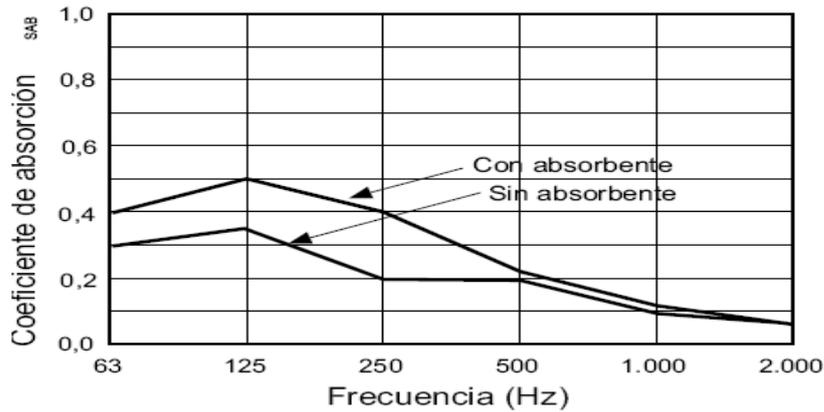
donde:

M = masa por unidad de superficie del panel (en Kg/m²)

d = distancia del panel a la pared rígida (en cm)

Aumentando el amortiguamiento del panel, se amplía la banda de frecuencias absorbidas, si bien puede disminuirse el coeficiente de absorción

El hecho de añadir material poroso en el espacio de aire detrás de la membrana provoca un considerable aumento de absorción.



Comparación de Coeficientes de absorción de un resonador de membrana con $M = 1,8 \text{ Kg/m}^2$ y $d = 4,4 \text{ cm}$ (con y sin absorbente en la cavidad)

En general, estos materiales acústicos presentan una curva de absorción en función de la frecuencia, en forma de campana, con un pico más o menos agudo en función del espesor del volumen de aire.

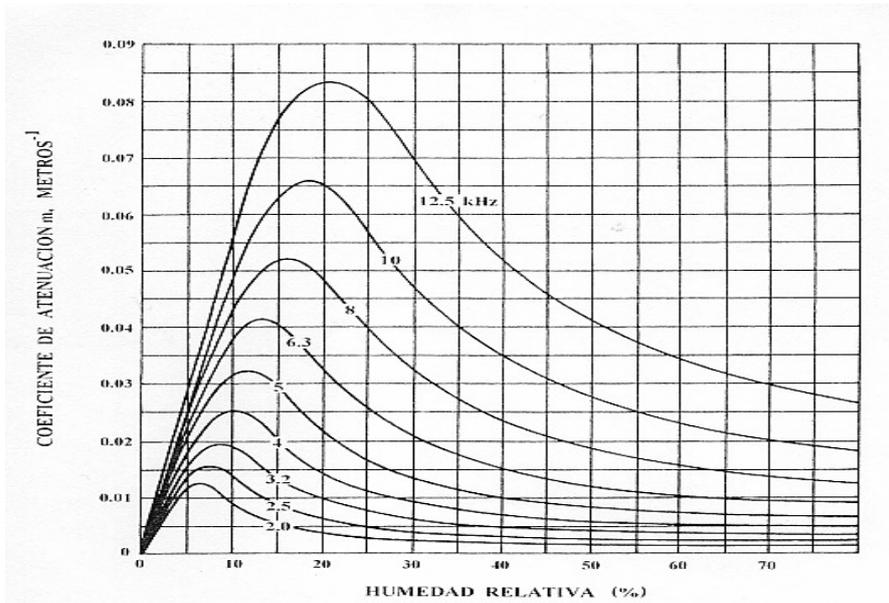
El coeficiente de absorción de cualquier material varía considerablemente con el ángulo de incidencia de las ondas sonoras. Como los materiales que se emplean para recubrir las superficies de un recinto, están expuestos normalmente a las ondas que inciden bajo diferentes ángulos aleatoriamente distribuidos.

Se define como **coeficiente difuso de absorción acústica a** , a la relación entre la energía sonora absorbida por una superficie uniforme, y la energía que incide uniformemente sobre dicha superficie. Este coeficiente, definido teniendo en cuenta la gran variedad de ángulos de incidencia de las ondas distribuidas en el recinto, puede caracterizar al mismo, sólo si las superficies que lo forman son suficientemente uniformes en sus propiedades físicas.

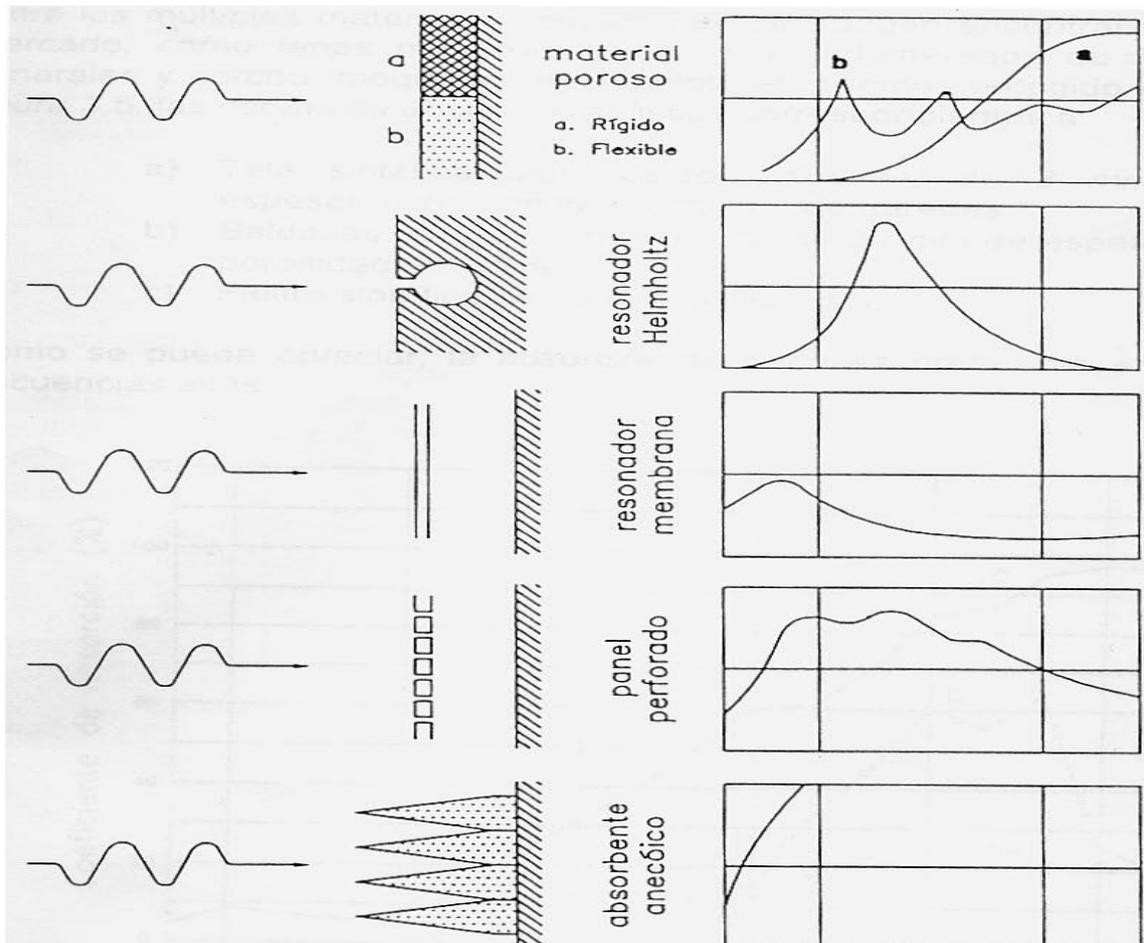
El **coeficiente de reducción de sonido (NRC)**, es el promedio de la absorción a 250, 500, 1.000 y 2.000 Hz, redondeando al más próximo en 0,05.

Absorción del aire

La dispersión geométrica, supone que la potencia acústica total permanece constante al alejarse de la fuente. Esto no es del todo cierto, de hecho, una parte de la energía se convierte en calor cuando viaja a través del aire; aunque esta conversión normalmente solo es importante para las frecuencias altas y cuando se consideran grandes distancias. La absorción "clásica" es debida a la viscosidad y a la conductividad térmica del aire, pero ambas son despreciables cuando se las compara con la absorción "molecular". La presencia de vapor de agua en el aire facilita la excitación por la onda acústica de las vibraciones resonantes de las moléculas del oxígeno y del nitrógeno. La cantidad de energía transferida por este mecanismo depende fundamentalmente de la frecuencia, de la humedad relativa y, en menor grado, de la temperatura.



Absorción del aire según frecuencia y humedad relativa por m³.



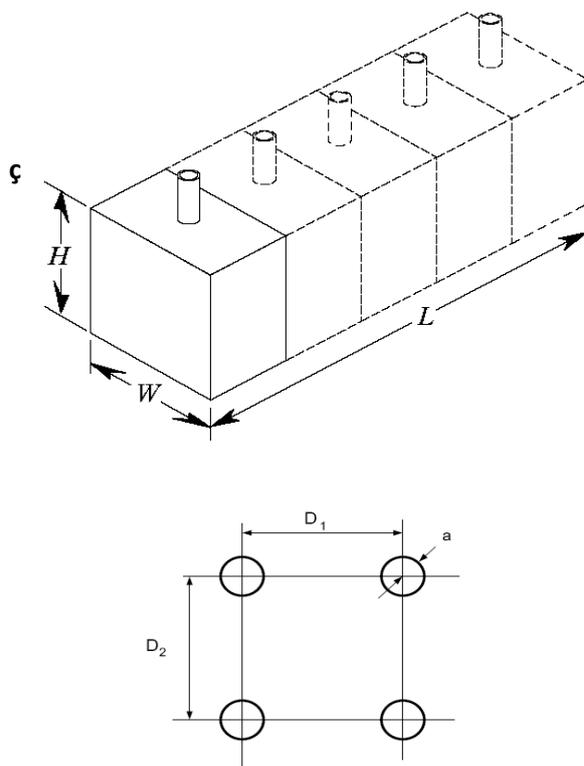
Materiales Absorbentes

Los materiales se emplean para acondicionamiento acústico, también como superficie de acabado de diferentes tipos de construcciones, con el fin de satisfacer determinadas

condiciones acústicas. Para que la superficie de un material absorba energía acústica es necesario: a) que la superficie sea relativamente transparente al sonido y, b) que el medio sea capaz de transformar más o menos completamente la energía vibratoria de las ondas en energía calorífica de fricción. La transparencia acústica se puede conseguir mediante una superficie expuesta a un material altamente poroso, o bien una lámina perforada usada como revestimiento de un material poroso, también mediante una membrana ligera flexible impermeable al aire o perforaciones o grietas mecánicas en el cuerpo de un material poroso, pudiendo ser la superficie externa impermeable. Todos estos materiales producen aumento de las transparencias a medida que aumenta la frecuencia. Algunas de las propiedades que merecen consideración, además de la absorción acústica, son el efecto decorativo, reflectividad lumínica, mantenimiento, duración, resistencia al fuego, etc.

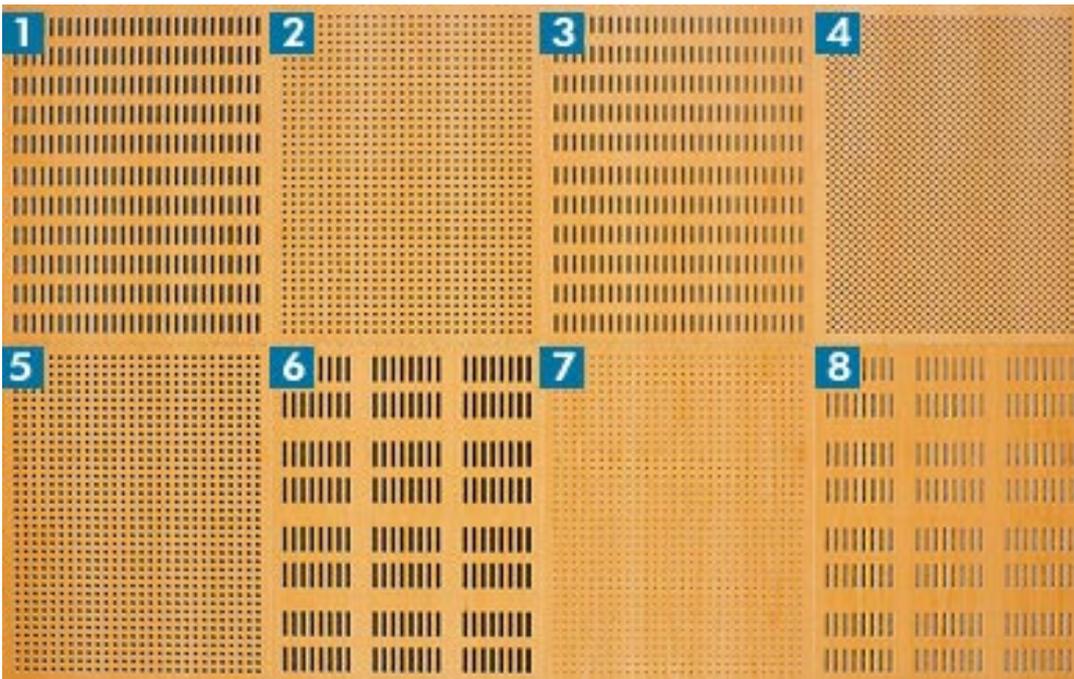
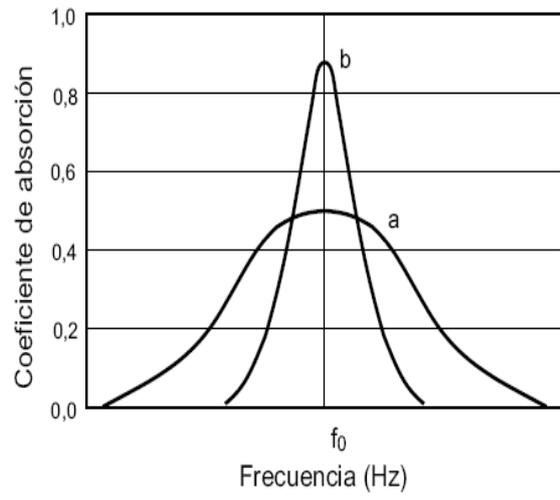
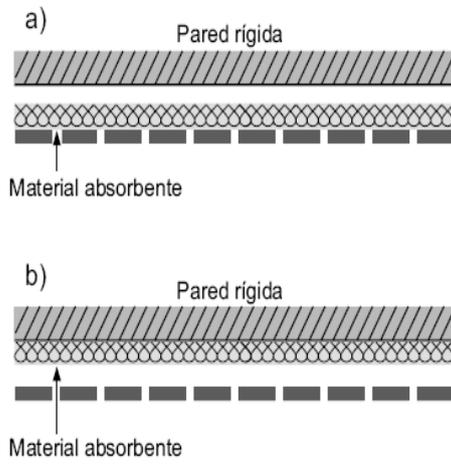
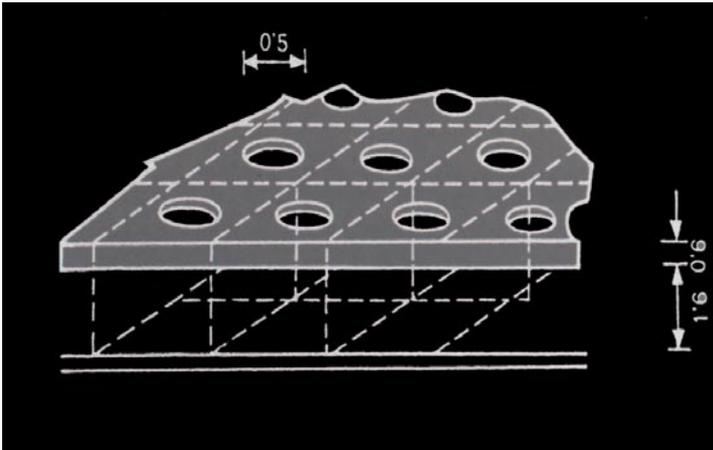
Los materiales de acabado de interiores, tales como hormigón, yeso, vidrio, mampostería, terrazo, etc., son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser muy reflectantes, con unos coeficientes de absorción inferiores a 0,05, sobre todo a las bajas frecuencias. Las alfombras y cortinas proporcionan una buena absorción acústica, en virtud de su porosidad. La absorción de las alfombras depende de un cierto número de factores, que incluyen altura de pelo, peso, tipo de apoyo, espesor y material del forro. En la mayoría de las alfombras, la absorción crece con la **frecuencia, alcanzando valores elevados en la zona de las altas frecuencias.** La absorción de las cortinas varía ampliamente, dependiendo de su peso y de la cantidad de pliegues. La absorción se incrementa especialmente a las bajas frecuencias, separando las cortinas algunos centímetros desde la pared. El equipamiento así como las personas agregan un incremento en la absorción sonora en un local.

Resonadores asociados



Cuando se perfora una lámina, con un patrón similar al indicado en la figura, y se coloca a una distancia H de un respaldo sólido, se forma un sistema de resonadores asociados.

Fig. 2.41 Detalle de un tramo unitario de un panel perforado con indicación de sus dimensiones características



Absorción acústica total en un recinto

La absorción total A_t , de un espacio arquitectónico, estará dada por la absorción de todos los cerramientos, objetos (equipamiento y personas) y del aire contenido.

$A_t = \Sigma (\alpha_i \cdot S_i) + A(\text{objetos}) + A(\text{aire})$ la unidad de absorción (Sabine) es el equivalente a 1 m^2 de superficie absorbente perfecta.

Si en el interior de un local existen diferentes objetos y personas para encontrar la absorción total de un número de objetos del mismo tipo, se multiplica la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos en el recinto. Se define como **coeficiente de absorción equivalente de un objeto** a la absorción total de un metro cuadrado de superficie, cuyo coeficiente de absorción es numéricamente igual a la absorción producida por un objeto.

La **absorción A** es la magnitud que cuantifica la energía extraída del campo acústico, cuando la onda atraviesa un medio determinado, o el choque de la misma con las superficies límites del recinto. Está dada para la absorción a la frecuencia f por:

$$A_f = \alpha_f \cdot S \quad (\text{m}^2)$$

donde S es el área total de las superficies en m^2 , y α_f es el coeficiente de absorción sonora del material a la frecuencia f .

La absorción acústica debida a las superficies límites del local será:

$$A_{\text{superficie}} = \alpha_m \cdot S = \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i \cdot S_i) \quad (\text{m}^2)$$

Si en el interior del recinto existen diferentes objetos y personas, para encontrar la absorción debida a los mismos multiplicamos la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos que hay en el recinto, es decir:

$$A_{\text{objetos}} = \alpha_1 \cdot n_1 + \alpha_2 \cdot n_2 + \dots = \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j \cdot n_j) \quad (\text{m}^2)$$

donde α_j es la absorción equivalente de cada elemento y n_j el número de elementos.

La absorción del aire está dada por la expresión

$$A_{\text{aire}} = 4 \cdot m \cdot V \quad (\text{m}^2)$$

donde m es el coeficiente de absorción del aire por metro y V es el volumen del recinto en m^3 .

Por consiguiente, la absorción total será:

$$A_T = A_S + A_0 + A_a = \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i \cdot S_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j \cdot n_j) + 4 \cdot m \cdot V \quad (\text{m}^2)$$

siendo el coeficiente medio de absorción acústica:

$$\alpha_m = \frac{A_s + A_0 + A_a}{S} = \frac{1}{S} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i \cdot S_i) + \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j \cdot n_j) + 4 \cdot m \cdot V \right]$$

Ejemplo de cómputo de la absorción total y cálculo del Tr en una sala de 72 m³.

Absorción en función de la frecuencia									
Volumen 72 m ³	Frecuencia	250		500		1000		2000	
	Superficie m ²	a	Sa	a	Sa	a	Sa	a	Sa
Paredes	50.56	0.01	0.50	0.02	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00
Techo	24	0.01	0.24	0.02	0.48	0.03	0.72	0.04	0.96
Suelo	24	0.01	0.24	0.02	0.48	0.03	0.72	0.04	0.96
Puertas	3.44	0.22	0.75	0.17	0.58	0.09	0.31	0.10	0.34
Ventanas	6	0.25	1.50	0.18	1.08	0.12	0.72	0.07	0.42
Absorción "A" expresado en m ²		3.23		3.62		3.47		3.68	
T = 0,16 x V/A ----->		3.50		3.20		3.30		3.10	

Reducción del tiempo de reverberación (TR) Mediante la aplicación de un falso techo de lana mineral									
Volumen 72 m ³	Frecuencia	250		500		1000		2000	
	Superficie m ²	a	Sa	a	Sa	a	Sa	a	Sa
Paredes	50.56	0.01	0.50	0.02	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00
Techo	24	0.37	8.88	0.84	20.16	0.73	17.52	0.64	15.36
Suelo	24	0.01	0.24	0.02	0.48	0.03	0.72	0.04	0.96
Puertas	3.44	0.22	0.75	0.17	0.58	0.09	0.31	0.10	0.34
Ventanas	6	0.25	1.50	0.18	1.08	0.12	0.72	0.07	0.42
Absorción "A" expresado en m ²		11.87		23.20		20.27		18.08	
T = 0,16 x V/A ----->		0.90		0.40		0.50		0.60	

EJEMPLOS DE TRATAMIENTOS ABSORBENTES EN DIBERSOS ESPACIOS



Tratamiento absorbente de una sala de grabación, con posibilidad de absorción variable.



Tratamiento fuertemente absorbente en un espacio de gran volumen (gimnasio).



Tratamiento fuertemente absorbente para el control de ruido en oficinas generales



Tratamiento con materiales reflejantes y absorbente para obtener un adecuado refuerzo del sonido reflejado sobre la audiencia y el tiempo óptimo de reverberación.

Bibliografía y Referencias

- **Beranek, Leo L.: “Acústica”. Editorial Hispanoamericana S. A. Buenos Aires (Arg.), 1961.**
- **Everest, F. Alton: “The Master Handbook of Acoustics”. McGraw-Hill. Blue Ridge Summit (USA) 1989.**
- **Harris, Cyril M.: : “Handbook of Acoustics”. McGraw-Hill. Blue Ridge Summit (USA) 1989.**
- **Knudsen, Vern O.; Harris, Cyril M.: “Acoustical Designing in Architecture”. American Institute of Physics. 1978.**
- **Miyara, Federico: “Acústica y Sistemas de Sonido”. UNR Editora. Rosario (Arg.), 1999.**
- **Hakas, Jorge: “Proyecto de Memoria General Constructiva (parte Acond. Acústico)”. Ministerio de Obras Publica y Transporte :: 2003**
- **Everst, F. Alton: Master Handbook of Acoustic . McGraw-Hill. 2001**