



Control por absorción acústica



prop. físicas del ruido	análisis espectral	técnicas de medida	efecto sobre las personas	criterios de evaluación	el medio industrial
el ruido de las ciudades	control del ruido	control por absorción	control por aislamiento	controles adm. y con p.p.	bibliografía



Absorción acústica

Acondicionamiento acústico interior de locales y recintos:

Cuando un foco sonoro emite energía acústica, las ondas sonoras se propagan a partir de él en forma de onda esférica si no encuentran ningún obstáculo en su camino. Al chocar contra algún obstáculo se reflejan cambiando su dirección. Si la superficie reflectante fuese completamente impermeable al aire y perfectamente rígida no habría pérdida de energía en cada reflexión. Sin embargo, en la realidad no existe un reflector perfecto, ya que éste entrará en vibración por efecto de la onda incidente, o permitirá la propagación de las ondas sonoras en el interior del material, si éste tiene estructura porosa. Como consecuencia de cualquiera de estos dos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía acústica que las incidentes, diciéndose que **parte de la energía acústica ha sido absorbida por la superficie**.

El sonido que genera un foco sonoro en el interior de un recinto incide sobre las superficies límite de éste, reflejándose en parte, y estas reflexiones tienden a aumentar el nivel de presión sonora en el interior del recinto (**figura 1**).

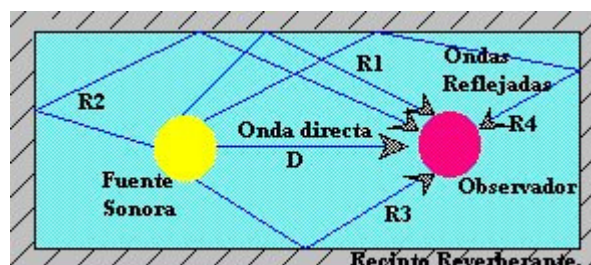


Fig.1.- Ondas directa y reflejada en un recinto.

Los materiales absorbentes sonoros son aquellos que reducen el nivel de energía sonora de las reflexiones que existen en el interior de un local.

En un recinto con una fuente sonora, si sus superficies límite son parcialmente reflectantes, el campo sonoro en el recinto tendrá dos componentes:

- El sonido directo que va de la fuente al observador.
- Los sonidos reflejados que llegan al observador después de reflejarse en las superficies límite. Esto crea un campo reverberante que se superpone al campo creado por la fuente.

Así, el campo sonoro se determina a partir de la potencia acústica de la fuente y de las propiedades reflectantes de las superficies límites.

Para que la superficie de un material absorba energía sonora es necesario que la superficie sea relativamente transparente al sonido y que el medio sea capaz de transformar al menos parcialmente la energía de las ondas en energía calorífica de fricción. La transparencia se puede conseguir mediante un material altamente poroso, o mediante una lámina perforada que recubre al material poroso. También puede ser una membrana ligera flexible impermeable al aire o perforaciones o grietas en el cuerpo de un material poroso, con superficie externa impermeable.

El acondicionamiento acústico de un local tiene como finalidad extraer energía sonora del campo acústico, absorbiéndola en los repetidos choques de las ondas contra las paredes.

Al incidir una onda sonora sobre una superficie absorbente, parte de la energía es absorbida, parte reflejada y parte transmitida al otro lado. La proporción entre ellas dependerá de la frecuencia de la onda incidente y de las características técnicas y constructivas del material, así como del ángulo de incidencia de la onda.

A la relación entre la energía acústica absorbida y la incidente sobre un material por unidad de superficie se le conoce como **coeficiente de absorción**.

El coeficiente de absorción acústica de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del

ángulo con que incide la onda sobre la superficie. Como el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen dar los mismos a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz (según [Norma UNE 74041-80](#) *Medida de Coeficientes de Absorción en Cámara Reverberante*, equivalente a la [ISO 354-1963](#)).

Los materiales acústicos absorbentes reciben las ondas bajo distintos ángulos de incidencia más o menos aleatorios. Por ello, sus coeficientes de absorción se calculan en cámaras reverberantes y el resultado se considera que es un valor medio para todos los ángulos de incidencia. Este coeficiente se llama de **Sabine**. El coeficiente de absorción de cualquier material absorbente cae cuando incide ruido a frecuencias inferiores a una de corte dada por el espesor del volumen de aire, ya que cuando su espesor es menor que $1/4$ de la longitud de onda incidente, el volumen actúa como resistencia acústica rígida. De forma aproximada, esta [frecuencia](#) de corte viene dada por:

$$f = \frac{c}{2d}$$

siendo "d" la anchura total del volumen de aire. De aquí la baja absorción de materiales de poco espesor (1 ó 2 cm) cuando se montan directamente sobre un soporte rígido, para frecuencias de 125 y 250 Hz. Se observa que es necesaria una anchura de al menos 10 cm para mantener una absorción elevada a las bajas frecuencias.

Un elemento que interviene en la absorción acústica, sobre todo a bajas frecuencias, es el espesor del volumen de aire existente entre la cara del material y la superficie rígida que lo soporta. Este volumen puede variar desde cero, cuando el material se monta directamente sobre el soporte rígido, hasta algunos metros como es el caso de los techos acústicos suspendidos. Se necesitan al menos 10 cm para mantener una alta absorción a las bajas frecuencias.

En la siguiente **tabla** se recogen algunos de estos valores. Los materiales porosos y blandos permiten la penetración de las ondas sonoras causando una gran absorción, mientras que las superficies con acabados no porosos (cemento, vidrio, hormigón, terrazo, etc) generalmente absorben menos del 5%, sobre todo a bajas frecuencias.

Material	Frecuencia					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ventana abierta	1	1	1	1	1	1

Hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Madera	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Fieltro asbestos (1cm)	-	-	0,35	0,30	0,23	-
Fieltro de pelo y asbestos	-	-	0,38	0,55	0,46	-
Fieltros sobre pared (3cm)	0,13	0,41	0,56	0,69	0,65	0,49
Corcho (3 cm)	0,08	0,08	0,30	0,31	0,28	0,28
Corcho perforado y pegado a la pared	0,14	0,32	0,95	0,90	0,72	0,65
Tapices	0,14	0,35	0,55	0,75	0,70	0,60
Ladrillo visto	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Enlucido de yeso sobre ladrillo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Idem sobre cemento	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,03
Enlucido de cal	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Paneles de madera	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Alfombra sobre cemento	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Celotex (22 mm)	0,28	0,30	0,45	0,51	0,58	0,57
Celotex (16 mm)	0,08	0,18	0,48	0,63	0,75	-
Vidrio	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Placas perforadas de material poroso	0,44	0,57	0,74	0,93	0,75	0,76

Tabla. Coeficientes de absorción de diferentes materiales.

De cara a facilitar los diseños constructivos, se da un nuevo coeficiente, muy en uso, que es la media aritmética de los coeficientes de absorción de un material a 250, 500, 1000 y 2000 Hz, redondeando al más próximo en 0,05. Se denomina **coeficiente de reducción de sonido (NRC)**.

La unidad de absorción es el *Sabín*, que equivale a una superficie de un pie cuadrado que tenga un coeficiente de absorción de la unidad. También existe el *Sabín MKS*, que hace referencia a una superficie de un metro cuadrado.

En la mayor parte de las situaciones prácticas, en el interior del local se logra una distribución homogénea de la energía sonora, cumpliendo las condiciones de campo difuso.

Además, y superpuesto al anterior, existe un campo directo generado por la energía sonora radiada por la fuente y que se propaga en el aire alejándose de ésta.

El nivel de presión sonora en cualquier punto interior de un recinto cerrado, será pues el resultado de las contribuciones de los campos directo y reverberante. Se expresa mediante:

$$L_w = L_p - 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{K} \right)$$

donde:

L_w : nivel de potencia sonora de la fuente, en dB .

L_p : nivel de presión sonora en el punto considerado, en dB .

Q : factor de directividad de la fuente.

r : distancia entre la fuente sonora y el punto, en m .

K : constante del local, en m^2 .

La constante de un local, K mide la capacidad de un recinto para la absorción del sonido, y puede calcularse como:

$$K = \frac{\alpha_m \cdot S}{1 - \alpha_m}$$

donde α_m es el **coeficiente medio de absorción**, que se calcula según:

$$\alpha_m = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

donde S es la superficie en m^2 .

La anterior ecuación describe de forma sencilla el campo sonoro en cualquier punto interior del recinto, y permite conocer la importancia relativa de las contribuciones de los campos directo y reverberante. En efecto:

- Si la absorción acústica es mínima, K es pequeña y predomina el término $4/K$, con lo que el nivel sonoro en cualquier punto del recinto será aproximadamente constante, independiente de la distancia (condición reverberante).
- Si existe una gran absorción acústica, K es grande y predomina el término $Q/4\pi r^2$, con lo que el nivel de presión sonora disminuye con la distancia (condición anecoica).

Esta ecuación también pone de manifiesto la importancia de la disposición de la maquinaria sobre la planta industrial en cuanto a los niveles de producción de ruido. **Veámoslo con un ejemplo:** supongamos un fabricante que desea determinar las características

técnicas de sus máquinas. Para ello hace tres ensayos:

- 1) Equipo dispuesto en un patio amplio, hormigonado, y a 2,5 m frente a la máquina hizo la medición del nivel de presión sonora, obteniendo $L_p = 87 \text{ dB}$. En este caso $Q=2$; $K(\text{aire libre}) = \text{infinito}$. Con lo que:

$$L_w = 87 - 10 \log \left(\frac{2}{4 \pi 2.5^2} + \frac{4}{\infty} \right) = 102.94 \text{ dB}$$

de potencia sonora.

- 2) Equipo en una cámara anecoica. Hizo la medición a una distancia de 1.5 m, obteniendo $L_p = 88.2 \text{ dB}$. En este caso $Q=1$; $K = \text{infinito}$. Con lo que:

$$L_w = 88.2 - 10 \log \left(\frac{1}{4 \pi 1.5^2} + \frac{4}{\infty} \right) = 102.71 \text{ dB}$$

lo que confirmaba el resultado anterior.

- 3) Esta máquina, el comprador la va a instalar en un recinto, junto a una pared. Los datos son:

$Q=4$; $K=1000 \text{ m}^2$. El trabajador situado en un puesto a 1.5 m de distancia, tendrá que soportar un nivel de presión sonora de:

$$102.71 = L_p - 10 \log \left(\frac{4}{4 \pi 1.5^2} + \frac{4}{1000} \right) \Rightarrow L_p = 94.3 \text{ dB}$$

Así, vemos que la misma fuente puede producir a 1,5 m de distancia 88,2 dB ó del orden de 94,3 dB, según las condiciones del local y de la ubicación de la máquina.

Las determinaciones de los niveles de ruido producidos por máquinas están desarrollados en normas técnicas específicas como la **BS 4813** o la **CECIMO** (europea), que especifican los ensayos en vacío y en carga, regímenes, etc.

Dentro de un campo acústico existe una distancia a la que el nivel de presión sonora debido a las ondas reflejadas se hace igual al de las ondas directas. Es la "**distancia crítica**", y dentro de ella no es apreciable el acondicionamiento acústico de las paredes, ya que dominan las ondas directas. Se calcula como:

$$r = 0.14 \sqrt{K \cdot Q}$$

donde:

r: distancia crítica, en *m*.

K: constante del local, en m^2

Q: factor de directividad

Como norma práctica, se puede decir que domina el ruido directo dentro de un cono teórico con el centro en la base de la máquina, el vértice en el techo y el radio de la base igual a la altura, lo cual indica que el acondicionamiento de techos y paredes pueden ser más eficaces en recintos con los techos bajos que con altos como se puede apreciar en la **figura 3**.

Como regla general se puede indicar que cuanto mayor es la absorción de un local, mayor es la distancia a la fuente a la cual un incremento de la absorción es plenamente efectivo. La fórmula anterior sólo es válida para distribuciones uniformes de la absorción y siempre que la distancia *r* obtenida sea inferior a la que existe entre la fuente de ruido y una pared límite del recinto, así como para pequeños valores del coeficiente de absorción.

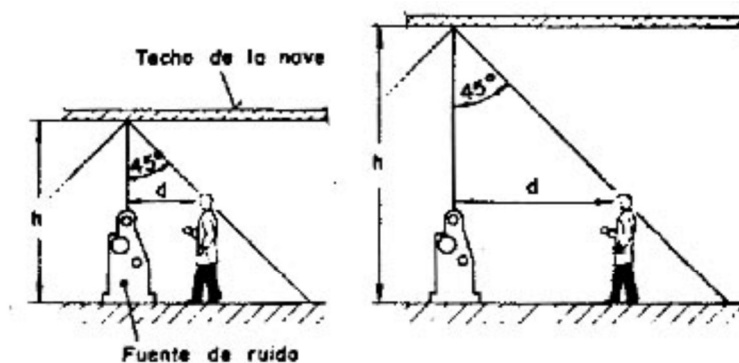


Figura 3. *Acondicionamiento en locales con techos bajos y altos.*

Vamos a ver cómo se puede calcular la atenuación del ruido, fuera de la distancia crítica, por el acondicionamiento de superficies con materiales absorbentes.

Veamos para ello algunos conceptos básicos:

- **Absorción A (m^2):** cuantifica la energía extraída del campo acústico cuando la onda sonora atraviesa un medio determinado, o en el choque con las superficies límites del recinto. Puede calcularse como:

$$A_f = \alpha_f \cdot s \quad \text{ó} \quad A = \alpha_m \cdot s$$

donde:

A_f : absorción para la frecuencia f , en m^2

A: absorción media, en m^2

α_f : coef. de absorción del material para la frecuencia f

α_m : coeficiente medio de absorción

s: superficie del material, en m^2

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

$$A_I = \sum_{i=1}^{i=n} (\alpha_i \cdot S_i)(m^2)$$

Se define como 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 el objeto.

Si en el interior existen objetos y personas, para encontrar la absorción debida a los mismos se multiplica la absorción equivalente de un objeto por el número de objetos iguales que haya:

$$A_2 = \alpha_1^* n_1 + \alpha_2^* n_2 + \dots = \sum_{j=1}^{j=m} (\alpha_j^* n_j) (m^2)$$

siendo α_j la absorción equivalente de cada objeto, y n_j el número de objetos.

La absorción total será $A = A_1 + A_2$

Según *L.L. Beranek*, cuando sobre una superficie se colocan un gran número de personas creándose por tanto en el recinto una superficie muy absorbente, la absorción debida al público no se obtiene multiplicando el coeficiente de absorción de una persona por el número de personas, sino que se aproxima más a la realidad multiplicar el área ocupada por el público por unos coeficientes de absorción experimentales que son:

--	--	--	--	--	--	--

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coef.	0.44	0.60	0.77	0.89	0.82	0.70

- **Tiempo de reverberación:** la reverberación es el fenómeno debido a la reflexión, por el cual seguimos teniendo la sensación de sonido en un lugar cerrado, cuando ha cesado la fuente productora. Si las superficies de reflexión son poco absorbentes, el sonido se irá apagando despacio, y viceversa (caso de las cámaras anecoicas).

El tiempo de reverberación es aquel en el que la presión acústica se reduce a la milésima parte de su presión inicial, una vez que ha cesado la fuente sonora, o sea, lo que tarda en decaer el sonido **60dB**. Depende sólo de las dimensiones del local, de la absorción de sus superficies, y del contenido que tenga. La ecuación más usada para calcular este tiempo es la de **Norris-Eyring**:

$$T = \frac{0.163V}{-s \ln(1 - \alpha_m) + 4mV}$$

siendo:

T: tiempo de reverberación, en s.

V: volumen del local, en m^3 .

s: superficie del local, en m^2 .

α_m : coeficiente de absorción medio del local.

Si el coeficiente α es pequeño ($\alpha < 0.2$), queda aproximadamente como:

$$T = \frac{0.163V}{A}$$

$$T = \frac{0.163V}{s\alpha_m + 4mV}$$

que es la conocida **Ley de Sabine**. Si se supone que una onda sonora se atenúa en su recorrido **m dB** por unidad de trayectoria, **el tiempo de reverberación de Sabine** será:

$$m = 8.94 \cdot 10^4 \cdot \frac{f^2}{\rho_0 \cdot c^3} = 1.89 \cdot 10^{11} \cdot f^2 (m^{-1})$$

siendo:

f: valor de la frecuencia.

ρ_0 : densidad del aire en condiciones normales.
 c : velocidad del sonido en el aire en condiciones normales.

La importancia relativa de la atenuación acústica ofrecida por el aire depende de los valores de la absorción total del recinto y del volumen de éste. En general, será importante para grandes volúmenes (*superiores a 5000 m³*) y a altas frecuencias (2000-4000 Hz). En otro caso se puede despreciar.

Si un recinto fuese totalmente absorbente, $\alpha = 1$ y T tendría un cierto valor. Pero si $\alpha = 1$, implica que toda la energía que incide sobre las paredes es absorbida, con lo que no tendría sentido hablar de tiempo de reverberación. Esto se debe a las suposiciones hechas en la obtención de la ecuación de *Sabine* (el campo en el interior del recinto es perfectamente difuso, la pérdida de energía es uniforme en cada una de las reflexiones), que raramente se dan en la práctica.

En general, esta ecuación es bastante precisa en la mayoría de las situaciones, y para coeficientes de absorción superiores a **0,2-0,3**, el error que se comete es del orden del **10%**.

Para predecir tiempos de reverberación en salas con gran variedad de materiales distintos (coeficientes de absorción muy variados), se ha comprobado experimentalmente que la ecuación más adecuada es la de *Millington-Sette*:

$$T = 0.163 \frac{V}{\sum_{i=1}^{i=N} S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

siendo:

S_i : área del material *i-ésimo*.

α_i : coeficiente de absorción del material *i-ésimo*.

El tiempo de reverberación no es constante para todas las frecuencias, ya que la absorción sonora tanto en el aire como en las superficies interiores depende de la frecuencia. Generalmente, los cálculos se hacen en bandas de octava para frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, que son a las que normalmente los fabricantes proporcionan los coeficientes de absorción de sus productos.

a reducción de niveles sonoros en locales antes y después de un acondicionamiento acústico se calcula como:

$$\Delta dB = 10 \log \frac{T_0}{T_1}$$

siendo T_0 y T_1 los tiempos de reverberación antes y después del tratamiento que también se puede expresar como:

$$\Delta dB = 10 \log \frac{A_1}{A_0}$$

siendo A_0 y A_1 la absorción del local antes y después del tratamiento.

De lo dicho anteriormente se puede observar en cuanto al acondicionamiento acústico de locales que:

El empleo de materiales absorbentes en superficies interiores sólo reduce el nivel sonoro en puntos cercanos a la fuente donde predomina el campo difuso.

En la práctica con los materiales absorbentes se obtiene una reducción máxima del nivel de presión sonora de unos 10 dB en puntos alejados de la fuente.

Cuando hay pocas fuentes sonoras en el recinto se podrá lograr una apreciable disminución del nivel sonoro por absorción sobre todo en puntos alejados.

Cuando hay muchas fuentes distribuidas por el recinto los materiales absorbentes no producen en general una disminución apreciable del nivel de presión sonora.

