

## Apuntes del Curso de Acústica Musical del año 2006

---

# Acústica Arquitectónica

- a. Introducción
  - Transiciones por medios diferentes
- b. Aislación Acústica
  - IR - Índice de Reducción
  - Aislación contra ruido aéreo
  - Aislación contra ruido de impacto
  - Índices de reducción de algunos cerramientos
- c. Tratamiento Acústico de las superficies
  - Estudio de las Reflexiones
  - Campo directo y campo reverberante
  - Tiempo de reverberación
  - Materiales absorbentes
  - Coeficientes de absorción de algunos materiales
- d. Modos normales de vibración en recintos

---

### a. INTRODUCCIÓN

Dentro de la gama de actividades que se ocupa la acústica, la Acústica Arquitectónica se ocupa de dos áreas específicas:

- *Aislación del ruido*: Sonidos indeseables que deben ser atenuados o extinguidos. Esto se refiere a aquellos sonidos producidos dentro del propio local y a la intromisión de ruidos ajenos al local que se produce a través de los diferentes cerramientos.
- *Tratamiento acústico*: En aquellos locales donde es importante una comunicación acústica -aulas, teatros, salas de ensayo- se necesita una distribución homogénea del sonido que preserve la cualidad y la inteligibilidad de la comunicación, evitando defectos acústicos comunes (ecos, resonancias, reverberación excesiva).

### Transiciones por medios diferentes

Cuando la onda de presión sonora encuentra un obstáculo (ej. una pared), el choque que se produce a nivel molecular hace que parte de esa energía vuelva en forma de energía reflejada y que el resto continúe hacia los otros medios como absorción y transmisión.

En la figura 1 se esquematiza el proceso energético en tres medios diferentes. Dada una cantidad de energía incidente ( $E_i$ ), parte de ella será absorbida por la pared ( $E_a$ ) y parte reflejada ( $E_r$ ). Parte de esta energía absorbida es disipada en forma de calor ( $E_d$ ), otra parte vuelve al medio inicial sumándose con la onda reflejada y el resto de la energía contenida en la vibración de la propia pared producirá una vibración en el aire del lado opuesto, funcionando como una nueva fuente sonora que generará una onda sonora en el tercer medio ( $E_t$ ).

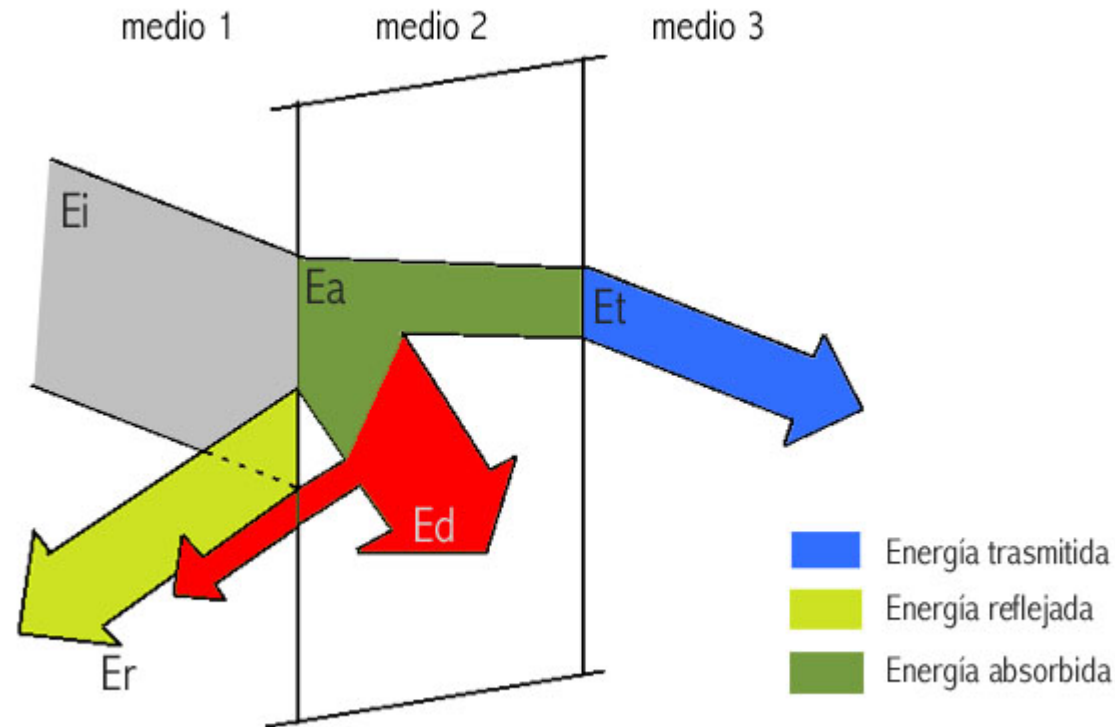


figura 1. Transiciones entre medios diferentes.

tendremos:

$E$  incidente =  $E$  reflejada +  $E$  absorbida

$E$  absorbida =  $E$  disipada +  $E$  transmitida

donde:

$$E_i = E_r + E_d + E_t$$

A su vez, si dividimos cada uno de los tres términos entre la  $E_i$  definiremos tres coeficientes que llamaremos:

$$\begin{aligned} E_r / E_i &= r \quad \text{coeficiente de reflexión} \\ E_t / E_i &= \tau \quad \text{coeficiente de transmisión} \\ E_a / E_i &= \alpha \quad \text{coeficiente de absorción} \end{aligned}$$

$$r + \alpha = 1 \quad ; \quad r + \tau + d = 1$$

## b. AISLACIÓN ACÚSTICA

### Índice de Reducción

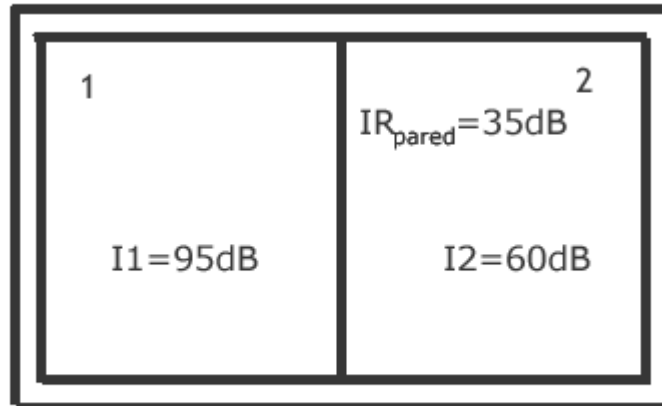


figura 2. Aislación entre dos recintos

Dado un recinto 1, con una fuente emitiendo sonido ( $I_1$ ), con superficies que tienen un determinado índice de absorción, podemos medir el valor de intensidad en un punto del recinto 2 ( $I_2$ ), el cual también tiene sus valores de absorción sonora. En este caso el sonido viajará por vía sólida a través de la estructura y por vía aérea a través de la pared divisoria. Si consideramos un caso donde sólo hay transmisión aérea podemos deducir la aislación entre ambas habitaciones como aquella producida por la pared divisoria.

Si las mediciones tomadas fueran:  $I_1=95\text{dB}$  y  $I_2=60\text{dB}$ , entonces tendremos un índice de reducción sonora (IR) para esta pared divisoria de 30 dB (un valor de IR=35 dB se obtiene por ejemplo con pared de 6 cm de ladrillo hueco).

$$\text{IR} = \text{NSI1} - \text{NSI2} \text{ (dB)}$$

EL valor de IR (Índice de reducción sonora) de un cerramiento se calcula en función del coeficiente de transmisión del material con la ecuación:

$$\text{IR} = 10 \log 1/\tau \text{ (dB)}.$$

Factores que inciden en IR:

1. Propios de la onda sonora (ángulo de incidencia, frecuencia).
2. Propios del cerramiento (masa, rigidez, condiciones de borde, estructura y forma).

### **Aislación contra ruido aéreo**

Las ondas sonoras que inciden en un cerramiento producen una vibración en el mismo, que irradiará hacia el otro lado en forma de energía sonora.

La cantidad de aislamiento que el cerramiento produce depende de la frecuencia de sonido incidente y de las características constructivas de la pared. La ley de masa indica que el aislamiento aumenta en aproximadamente en 6 dB por duplicación de masa. También hay un aumento de aislación en función de la frecuencia de 6 dB por octava.

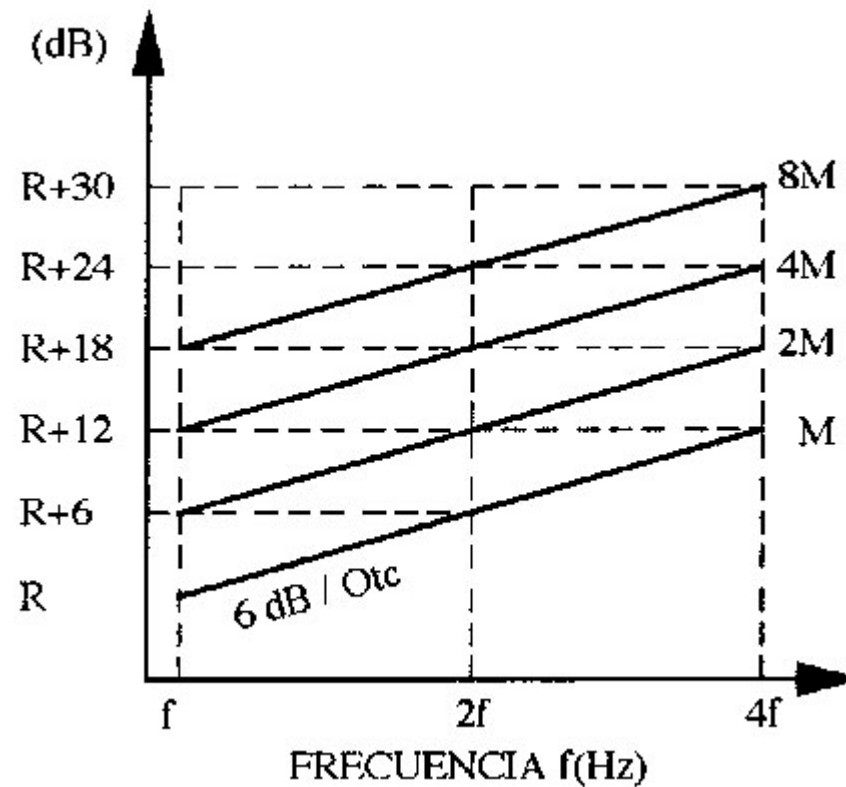


figura 3. Ley de masa en una pared simple.

Medidas para mejora el aislamiento de un cerramiento:

- Gran masa - alta rigidez
- Masa considerable - baja rigidez

### Aislación contra ruido de impacto

El caso más importante es el impacto en el piso. La sonoridad de estos impactos en el local contiguo dependerá de la construcción del piso y de la superficie.

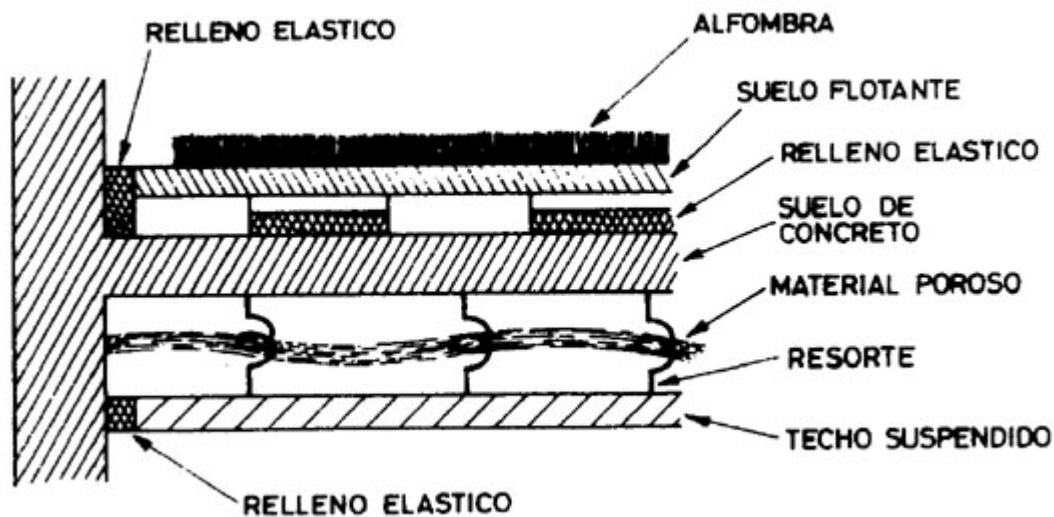


figura 4. Detalle constructivo para reducir el ruido por impacto

### Indices de reducción de algunos cerramientos

	125	250	500	1000	2000
pared de 22 cm de ladrillo macizo	39	39	45	52	59
pared de yeso de 75 mm	29	34	27	31	41
vidrio fijo de 6mm sellada en todo el borde	25	28	31	34	30

Ejemplo práctico: sala para el eMe



figura 5. Detalle doble ventana

### **c. TRATAMIENTO ACÚSTICO DE LAS SUPERFICIES**

#### **Estudio de las Reflexiones**

Se demuestra geoméricamente que la onda reflejada determina con la superficie reflejante un ángulo igual al determinado por la onda incidente. Desde allí se deduce un mecanismo práctico para obtener un rayo reflejado: cualquiera que sea el rayo, este pasará por un punto simétrico de la fuente (fuente virtual) en relación al plano reflejante.(fig. 2)

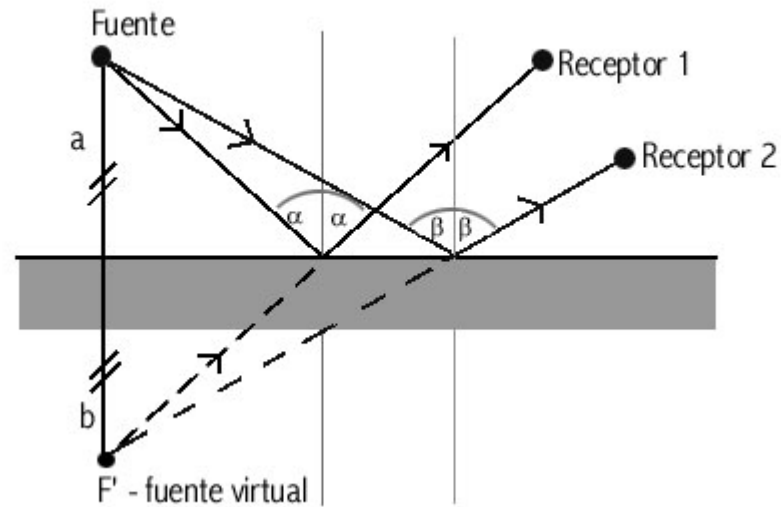


figura 6 - reflexión en superficies planas.

En superficies no planas, el problema se complica bastante. Por lo que podemos decir que una superficie convexa difunde el sonido mientras que una superficie cóncava lo concentra en forma no homogénea, generando zonas focales de gran concentración y otras sordas, que no reciben ninguna reflexión.



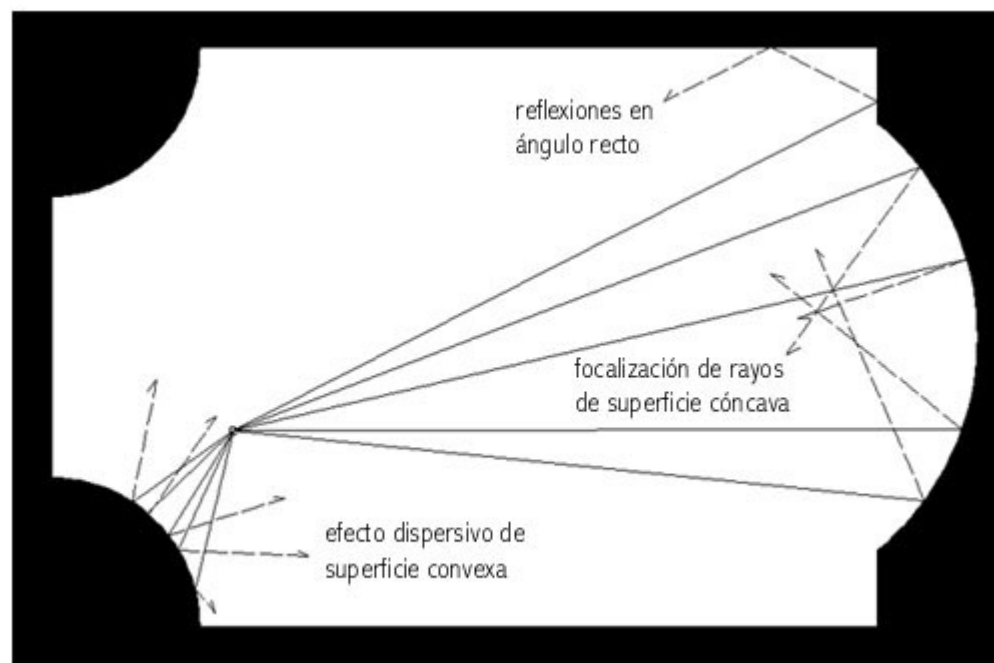


figura 7 - reflexiones en superficies curvas.

### Intensidad de sonido reverberante

En un recinto cerrado donde está emitiendo una fuente sonora puntual, si sus paredes laterales, suelo y techo son parcialmente reflectantes, el campo sonoro dentro del mismo estará formado por dos partes:

1. El sonido directo  $D$  que va desde la fuente al observador, siendo el mismo que bajo las condiciones de campo libre.
2. Los sonidos reflejados  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies.

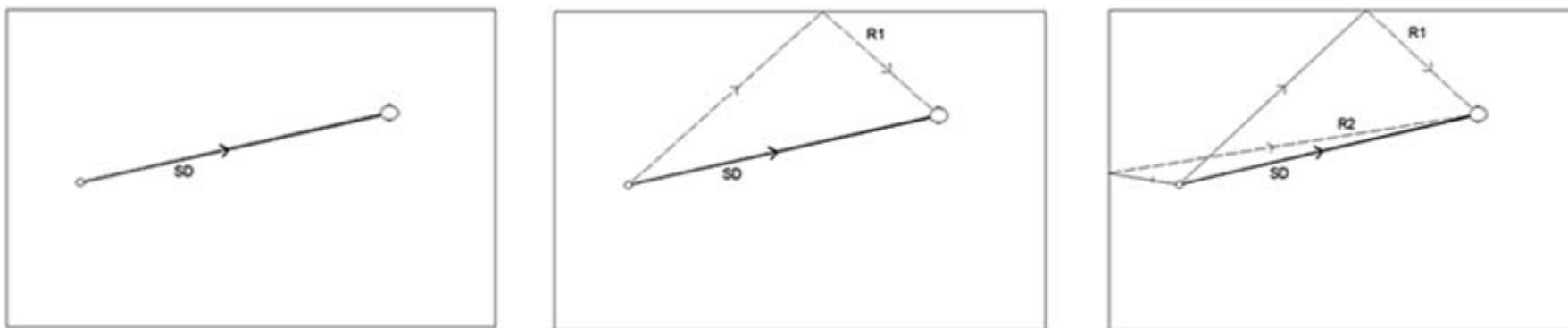


figura 8 - Esquema de rayos del sonido directo y dos reflexiones R1 y R2.

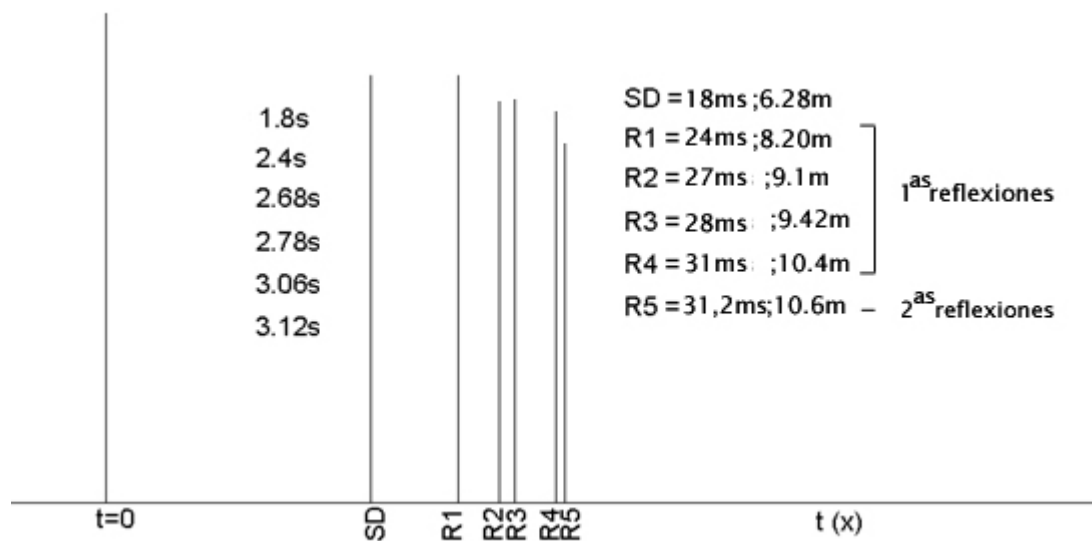


figura 9 - tiempos de retardo.

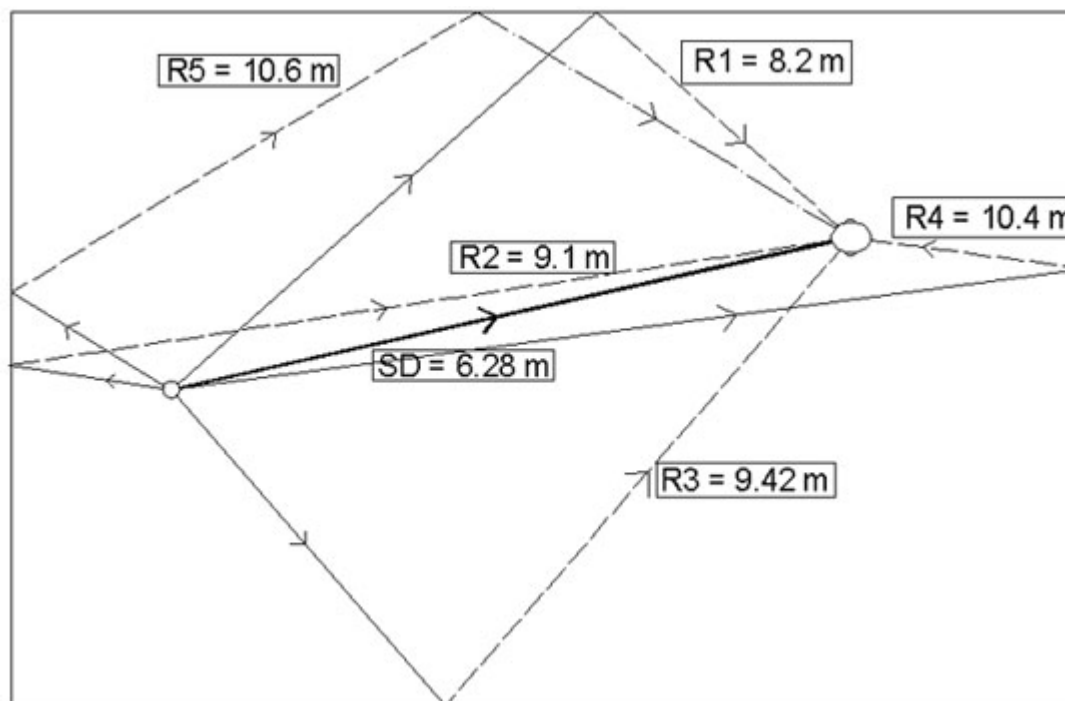


figura 10 - reflexiones en un recinto.

El sonido producido por una fuente continua dentro de un recinto cerrado, incide sobre las superficies límites del mismo, reflejándose una parte - absorbiéndose otra-, tendiendo estas reflexiones a aumentar el nivel de presión sonora en el recinto. En el recinto la energía crecerá hasta igualar la que sale por absorción, definiéndose un balance energético.

También se afectará la intensidad de cada reflexión con respecto a la emisión de la fuente y a las componentes en frecuencias. Cada nueva reflexión será afectada por el coeficiente de absorción de la superficie, disminuyendo así su intensidad. También habrá disminución de intensidad por recorrido de distancia.

### **Campo directo y campo reverberante**

Entonces, por campo sonoro se entiende el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio. A los efectos del análisis, el campo sonoro se divide en dos componentes: el campo directo y el campo reverberante. De acuerdo con lo expuesto, el campo sonoro se determina a partir tanto de la potencia de la fuente como de las propiedades reflectantes de las superficies del recinto.

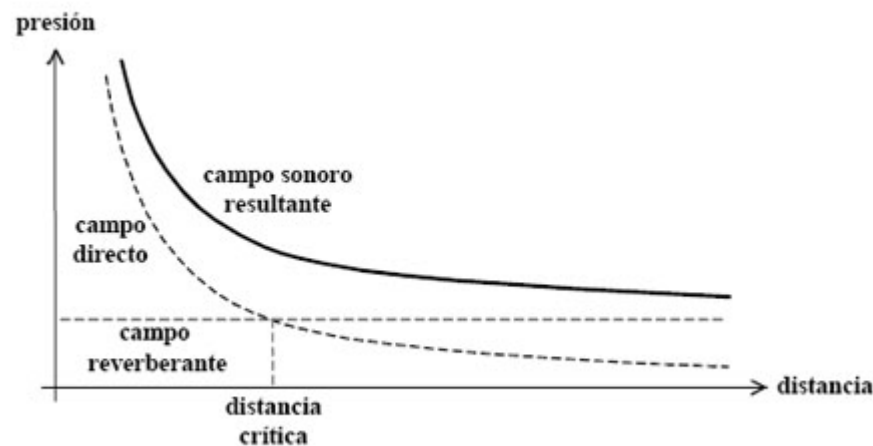


Figura 10 - Campo directo y campo reverberante. Se indica también la distancia crítica, que limita las regiones donde predomina una u otra componente del campo sonoro.

Estudiamos entonces la relación entre el sonido directo y el sonido reverberado:

1. Si la absorción es grande el campo sonoro está dominado por su componente directa (cámara anecoica).
2. Si la absorción es moderada, entonces en las proximidades de la fuente predomina el campo directo (también denominado, por este motivo, campo próximo), y a mayor distancia predomina el campo reverberante (denominado entonces campo distante). Si bien no existe un límite definido entre ambos, existe una distancia crítica, más allá de la cual predomina el campo distante, y por debajo de la cual predomina el campo próximo.
3. Si la absorción es muy baja, entonces salvo muy cerca de la fuente, predomina el campo reverberante.

## Tiempo de reverberación

La simple existencia de cerramientos en un recinto da origen a sonidos reflejados y da lugar al surgimiento de una "intensidad reverberante" en el interior. Este fenómeno se llama reverberación y tiene tres formas de incidir en el sonido dentro del recinto:

1. Debido a que la absorción de los diferentes materiales es selectiva con relación a la frecuencia, el espectro resultante del sonido reverberante no coincide con el espectro original del sonido directo.
2. La distribución no homogénea de materiales absorbentes en el recinto genera una distribución no homogénea del sonido.

3. El sonido reverberante persiste un cierto tiempo en el local, aún después de que la fuente deja de emitir sonido.

Existe una unidad comparativa para medir el tiempo de reverberación ( $T_{60}$ ), que es definida como el tiempo que demora un sonido en disminuir en 60 dB su nivel.

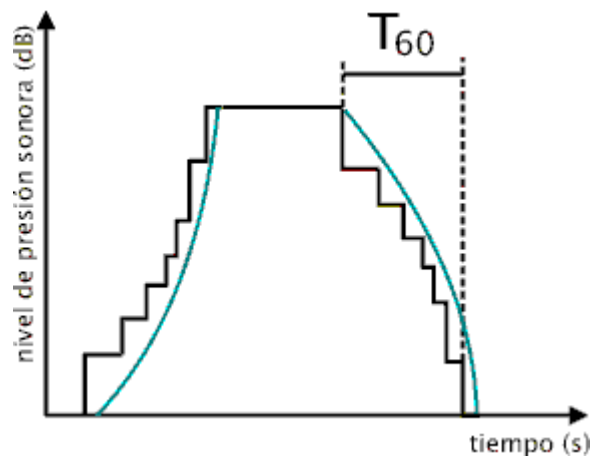


figura 11. Comportamiento de la reverberación en un recinto cerrado.

Cálculo del tiempo de reverberación según Sabine:

$$T_{60} = 0.161 (V/A) \text{ ; en segundos}$$

donde:

$V$  = volúmen total del recinto

$A$  = absorción total en Sabines métricos

$$A = \alpha_m \cdot S$$

$\alpha_m$  = coef. de absorción media en el recinto

$S$  = Superficie total en  $m^2$

Los tiempos óptimos de reverberación fueron determinados experimentalmente en función del volúmen del local y de su uso.

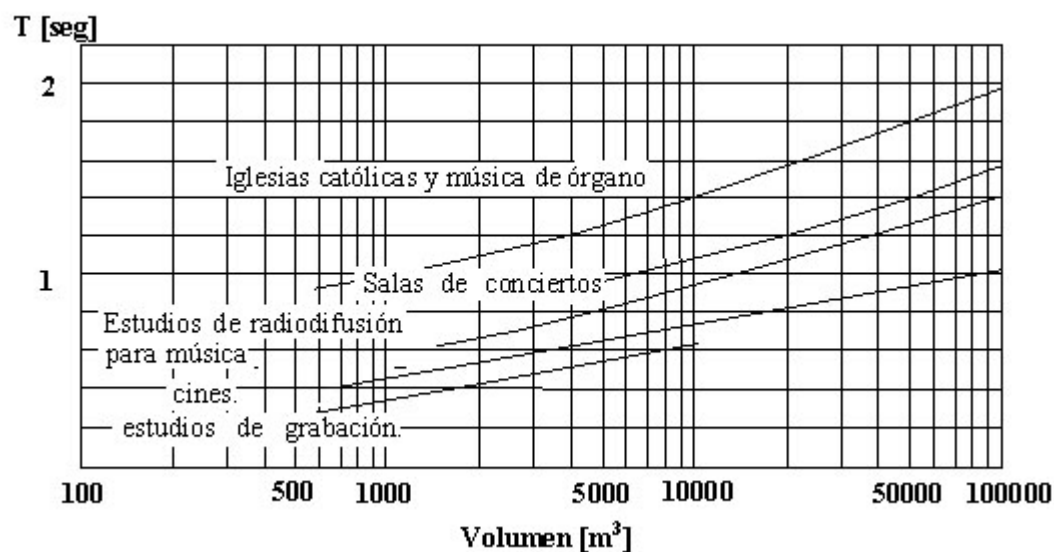


figura 12. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala para  $f = 500$  Hz según Leo Beranek.

$$A_{total} = A_{superficies} + A_{objetos} + A_{aire}$$

$$A_{superficies} = \alpha_{media} \cdot S_{total}$$

$$\alpha_{media} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_{total}}$$

## Materiales porosos

El coeficiente de absorción acústica de los materiales varía con la frecuencia del sonido (bandas de octava 125-250-500-1000-2000 Hz). Los materiales porosos tienen mayor efectividad en las frecuencias agudas.

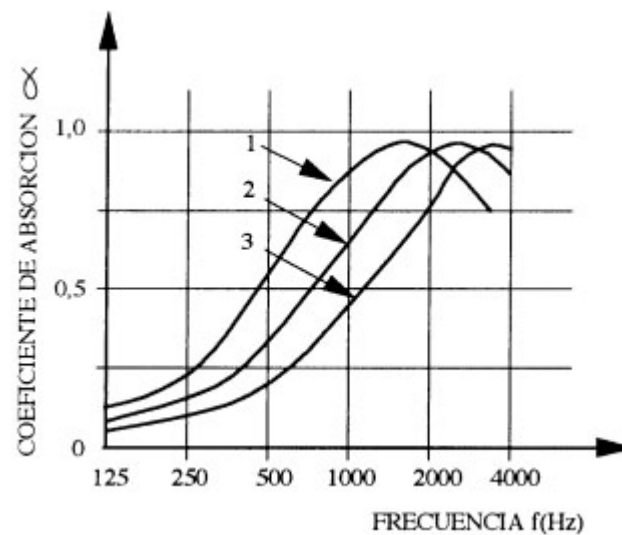


figura 13. Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia para fieltro con diferentes porosidades (1,2 y 3)

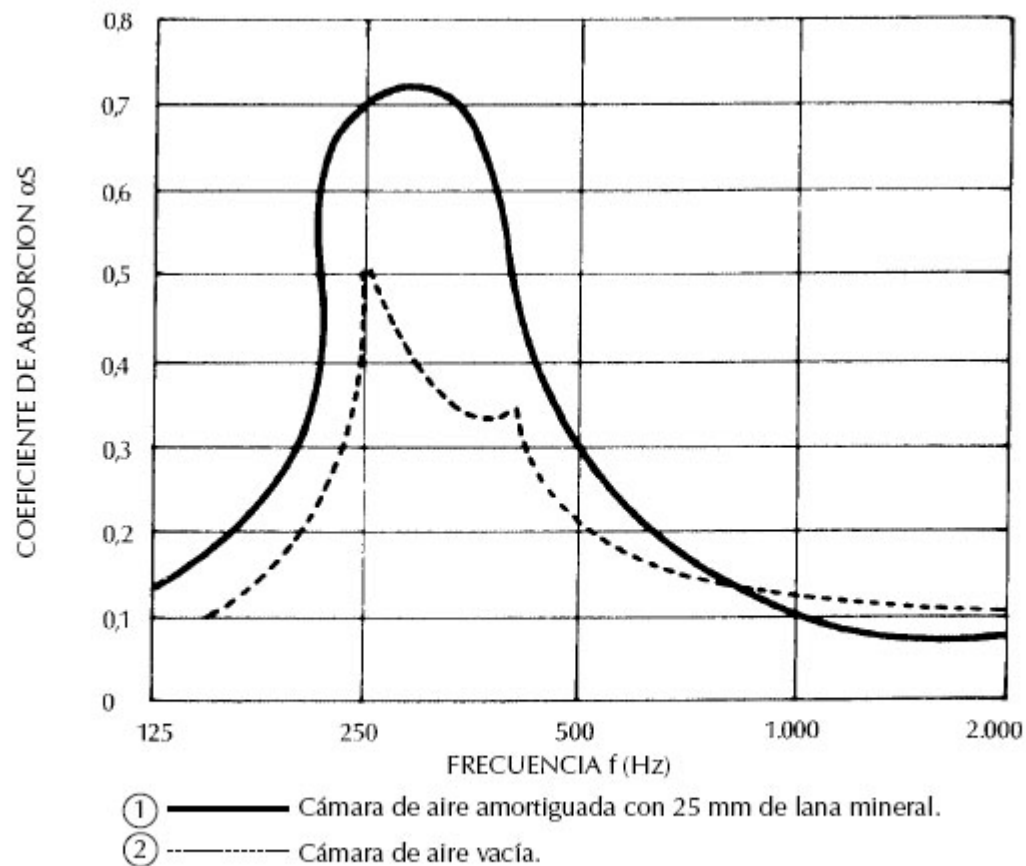
Los materiales porosos causan una disipación de la energía sonora en calor por fricción. Existe una relación entre el espesor del material y la longitud de onda. En este grupo están los yesos, lanas de vidrio, lanas de roca, fieltros, etc.



figura 14. Placa Fonoabsorbente con cuñas anecoicas.

## Placas Vibrantes

Membradas fijadas en su perímetro, estimuladas a vibrar por la onda sonora, transformando parte de esta en calor. Generalmente se emplean paneles de compensado de madera, apoyados sobre bastidores a una determinada distancia de la pared. El mayor problema que presenta este sistema es su selectividad en las frecuencias, que puede ser atenuada colocando un material poroso en la cámara de aire.



Coefficientes de absorción acústica de un panel contrachapado de 1,5 mm. con cámara de aire de 60 mm.  
figura 15.

## Resonadores de Helmholtz



Existe una tercer posibilidad, especialmente en casos de necesitar una absorción selectiva. Son los llamados resonadores de Helmholtz, que consistne básicamente en un receptáculo en forma de celda, que separa el aire del resto a través de un pequeño cuello.

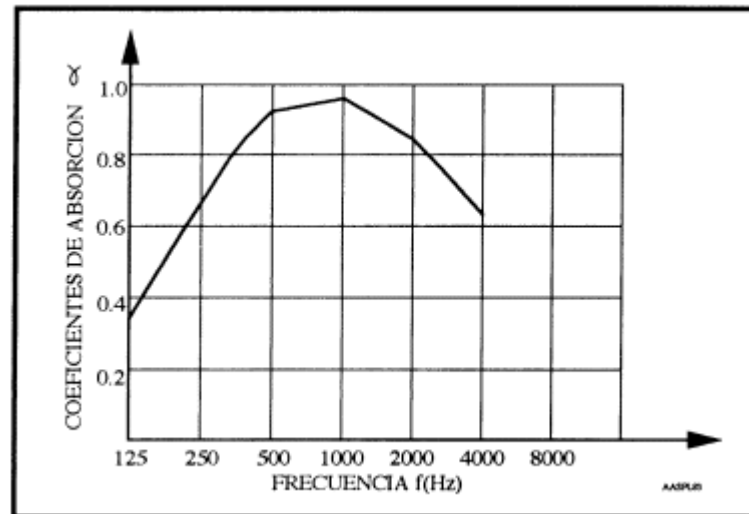


figura 17. Coeficiente de absorción acústica medio de un conjunto de panel de metal perforado y relleno de fibra mineral.

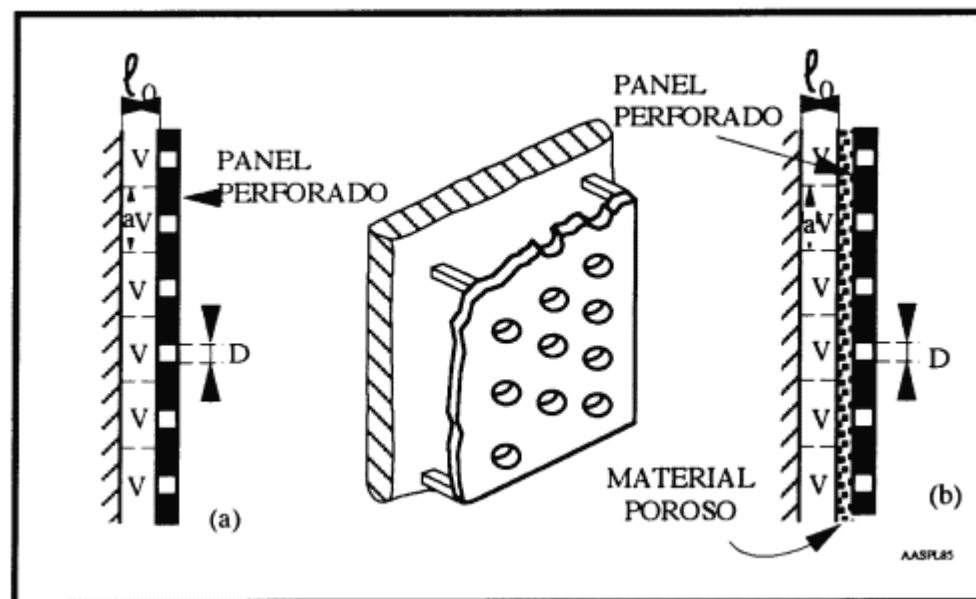


figura 18. Esquema de un resonador de Helmholtz

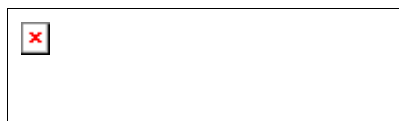
### Coefficientes de absorción de algunos materiales

	125	250	500	1000	2000
wall de ladrillo	0.025	0.025	0.03	0.04	0.05
contrachapado de madera 6mm con 80mm de cavidad de aire rellena con absorbente	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09
alfombra pesada	0.08	0.24	0.57	0.69	0.71
audiencia en butacas tapizadas	0.52	0.68	0.50	0.60	0.60

### d. MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN

Para todo cuerpo físico existen, en función de sus formas y dimensiones, una o varias frecuencias que al ser excitado por una onda sonora, provocan una vibración del cuerpo. Esto resulta en un sonido de la misma frecuencia, de manera más o menos audible y son llamadas frecuencias de resonancias.

Un modo normal de vibración de cualquier sistema vibratorio es una frecuencia con la cual el sistema puede oscilar durante algún tiempo después de interrumpida toda excitación.

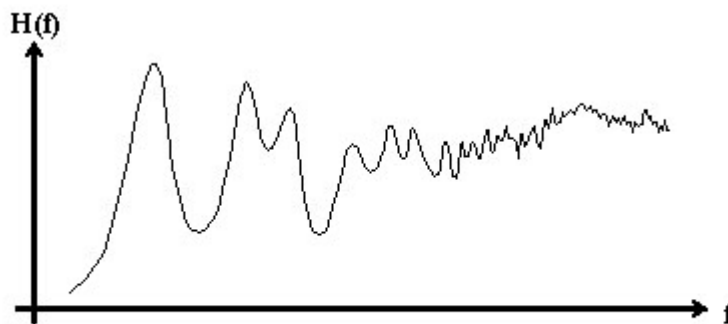


donde,  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  son dimensiones del recinto y  $n_y$ ,  $n_x$ ,  $n_z$  son enteros naturales y determinan el modo de vibración ej:(1,0,0);

$c$  = velocidad del sonido en el aire en m/s

$f$  = frecuencia de resonancia

Un recinto determina los modos de resonancia - las frecuencias que se resaltarán sobre otras - a partir de las dimensiones del mismo. Si las dimensiones son grandes, los primeros modos de resonancia serán de bajas frecuencias y se irán densificando a medida que aumentan los números de modo estudiados. Por lo cual, esto resultará de particular importancia en los recintos de dimensiones pequeñas, ya que los primeros modos se ubican en frecuencias audibles y separadas entre sí.



Respuesta en frecuencia de un recinto. Las irregularidades provienen de los diversos modos normales.

figura 19.

primeros 5 modos de resonancia de una habitación pequeña:

Largo = 7

Ancho = 5.9

Alto = 3.4

1	24.57143
2	29.15254
3	38.12645
4	49.14286
5	50.58823

primeros 5 modos de resonancia de una habitación grande:

Largo = 15

Ancho = 12

Alto = 7

1	11.46667
2	14.33333
3	18.35562
4	22.93333
5	24.57143

Referencias bibliográficas:

"Elementos de acústica arquitectónica" - Conrado Silva de Marco - San Pablo : Nobel, 1986.

"ABC de la acústica arquitectónica" - Arau, Higiní - Grupo Editorial CEAC, S. A.

---

última actualización: 2006-06-14