

## Capítulo 3

# Acústica arquitectónica

### 3.1. Acústica arquitectónica

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

*Defensa contra el 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.

*Control y diseño del sonido en los recintos:* 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).

#### 3.1.1. 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 3.1 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 ( $E_a$ ). 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 ( $E_t$ ). Escribiendo este proceso en función de las intensidades tendremos:

$$I_{\text{incidente}} = I_{\text{reflejada}} + I_{\text{absorbida}}$$

$$I_{\text{absorbida}} = I_{\text{disipada}} + I_{\text{transmitida}}$$

donde:

$$I_i = I_r + I_d + I_t$$

A su vez, si dividimos cada uno de los tres términos entre la  $I_i$  tendremos la suma de tres coeficientes que llamaremos:

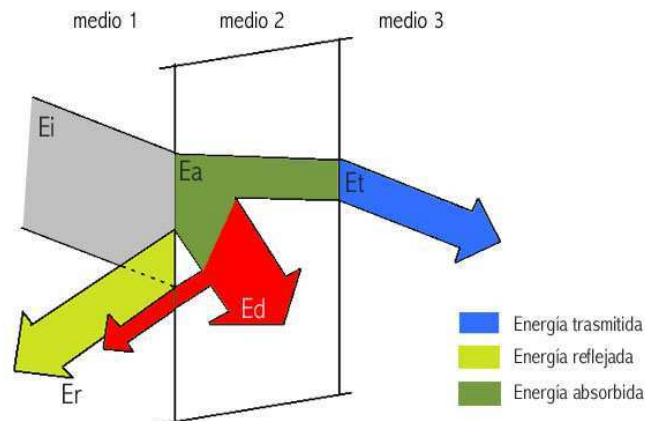


Figura 3.1: Transiciones entre medios diferentes.

- $I_r/I_i = r$  coeficiente de reflexión
- $I_t/I_i = t$  coeficiente de transmisión
- $I_a/I_i = a$  coeficiente de absorción

de donde se cumple que,

$$r + a = 1 \quad r + t + d = 1$$

### 3.1.2. Reflexión

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 (ver figura 3.2).

En superficies no planas (figura 3.3), 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.

### 3.1.3. Difracción-teoría de Huygens

La experiencia indica que los obstáculos no proyectan una sombra acústica completa en el camino del sonido. Esto se debe a la difracción, fenómeno que hace que el sonido "de vuelta las esquinas". Una explicación de este efecto se obtiene con la teoría de Huygens, quien determinó que en la propagación del sonido, cada molécula se convierte en una nueva fuente sonora secundaria de emisión esférica.

Las longitudes de onda tienen tamaños de escala arquitectónica. Ejemplos:

- $c=340 \text{ m/s}$  ;  $f_1=20 \text{ Hz}$  ;  $T = 1/20 = 0,05\text{s}$  ; longitud de onda =  $340 \text{ m/s} \times 0,05\text{s} = 17 \text{ m}$

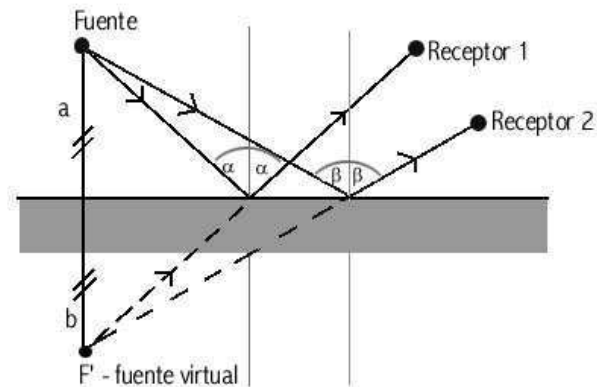


Figura 3.2: Reflexión en superficies planas.

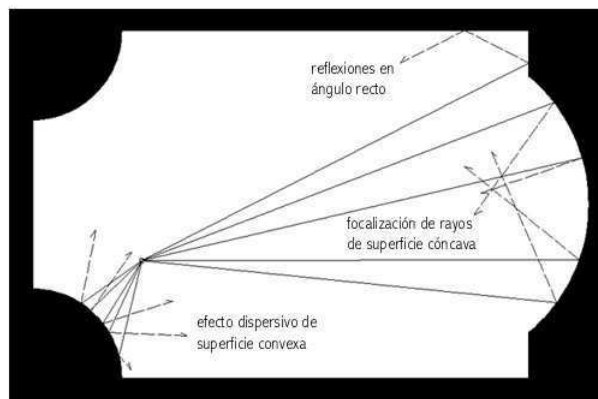


Figura 3.3: Reflexiones en superficies curvas.

- $c=340 \text{ m/s}$  ;  $f_2=20000 \text{ Hz}$  ;  $T = 1/20000 = 0,00005\text{s}$  ; longitud de onda =  $340 \text{ m/s} \times 0,00005\text{s} = 0,017 \text{ m}$

Esta gran diferencia en los tamaños de onda del sonido genera comportamientos diferenciales en la difracción. Estas circunstancias también condicionan la reflexión de las superficies.

### 3.1.4. Intensidad de sonido reverberante

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.

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.

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 R1, R2, . . . , que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies.

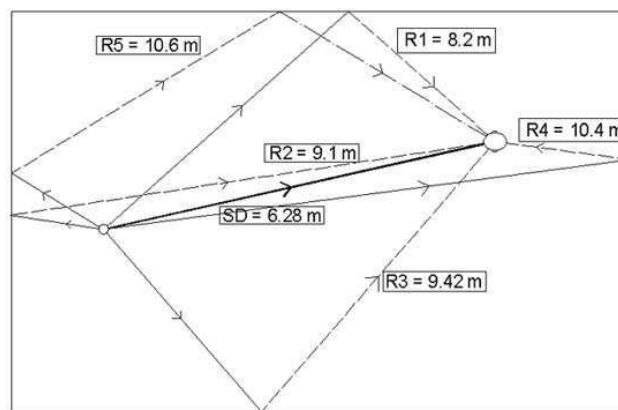


Figura 3.4: Primeras reflexiones en un recinto.

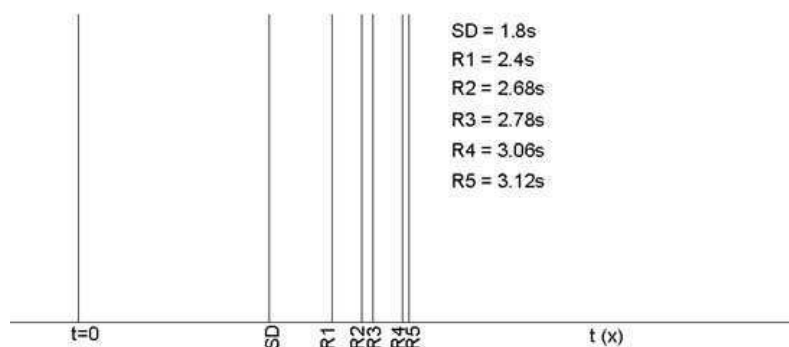


Figura 3.5: Tiempos de retardo.

El fenómeno de la reverberación se determina en el tiempo, pero también en las variaciones de intensidad de cada reflexión con respecto a la anterior y en las frecuencias que afecta el material

de la superficie. Cada nueva reflexión será afectada por el coeficiente de absorción de la superficie, disminuyendo así su intensidad reflejada. La potencia absorbida crecerá con la siguiente relación:

$$W_{abs} = I_r \cdot A; \quad \text{donde } I_r = \text{Intensidad reverberante}, \quad A = \text{Unidades de absorción.}$$

**Intensidad reverberante:** valor medio estadístico de las intensidades en el complejo sistema de ondas sonoras que se propagan en el interior del recinto, constituido por las diferentes ondas reflejadas por los cerramientos (paredes, ventanas, puertas) y objetos contenidos en el local.

**Unidades de Absorción:**  $A = a \cdot S$  (sabines) Superficie que ocupa un material en un recinto por su coeficiente de absorción. Es el área equivalente a un material con absorción máxima hipotética  $a = 1$ .

Estudiemos entonces la relación entre el sonido directo y el sonido reverberado (figura 3.6):

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.

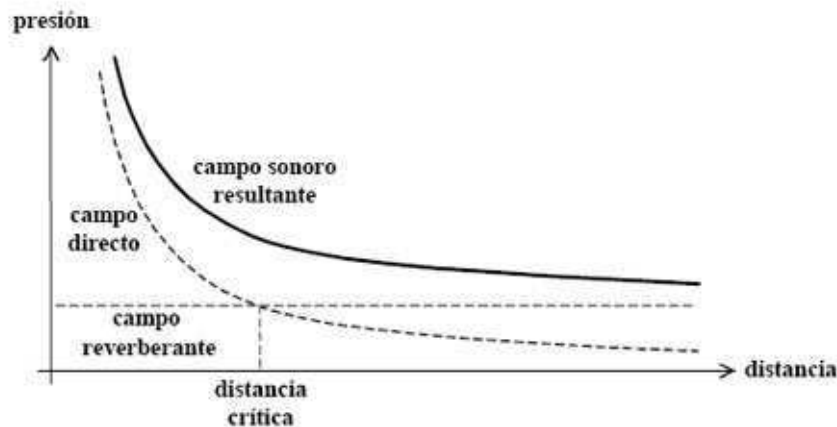


Figura 3.6: Campo directo y campo reverberante. Se indica también la distancia crítica, que limita las regiones donde predomina una u otra componente del campo sonoro.

### 3.1.5. Estudio de la aislación

Dada la situación de la figura 3.7, 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:  $I_1 = 120dB$  y  $I_2 = 65dB$ , entonces tendremos un índice de reducción sonora ( $IR$ ) para esta pared divisoria de  $30dB$  (un valor de  $IR = 30dB$  se obtiene por ejemplo con pared de 45 cm de ladrillo macizo).

$$IR = NSI_1 - NSI_2 \quad (dB).$$

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

$$IR = 10 \log\left(\frac{1}{t}\right) \quad (dB).$$

Factores que inciden en el IR:

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

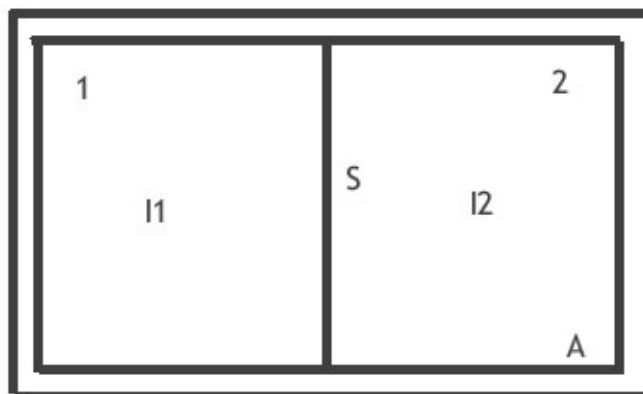


Figura 3.7: Recintos contiguos separados por una superficie S.

## 3.2. Comportamiento del Sonido en los recintos

### 3.2.1. Modos normales de resonancia - Respuesta en frecuencia

Para todo cuerpo físico existen, en función de sus formas y dimensiones, una o varias frecuencias tales 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 resonancia.

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.

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

donde,  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  son dimensiones del recinto,  $n_y$ ,  $n_x$ ,  $n_z$  son enteros naturales y determinan el modo de vibración (por ejemplo, [1,0,0]),  $c$  es la velocidad del sonido en el aire (en m/s) y  $f$  es la 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.

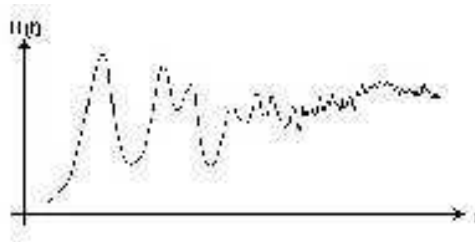


Figura 3.8: Repuesta en frecuencia de un recinto. Las irregularidades provienen de los diversos modos normales.

### 3.2.2. 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.

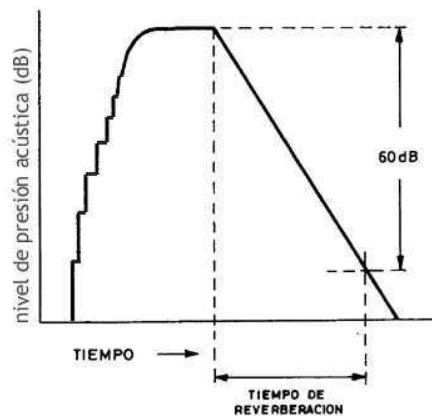


Figura 3.9: Comportamiento de la reverberación en un recinto cerrado.

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.

El tiempo de reverberación según Sabine se calcula como:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \quad (s)$$

donde, 0,161 es el valor de una constante para una temperatura de 20°C,  $V$  es el volumen en  $m^3$ ,  $A$  es la absorción total en Sabines  $m^2$ . La absorción total se calcula como  $A = aS$ , donde  $S$  es el área total de sus superficies interiores y  $a$  es el coeficiente de absorción sonora, que debe ser  $a < 0,2$ .

Los tiempos óptimos de reverberación fueron determinados experimentalmente en función del volumen del local y de su uso. En la figura 3.10 se presenta una serie de valores óptimos para distintos tipos de locales.

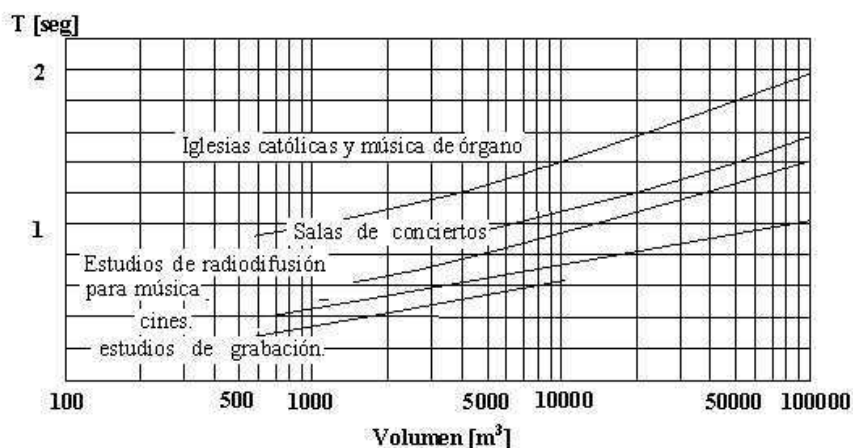


Figura 3.10: Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala para  $f = 500$  Hz según Leo Beranek.



**Unidades de Absorción:**

$$A = a.S(\text{sabines})$$

Superficie que ocupa un material en un recinto por su coeficiente de absorción. Es el área equivalente a un material con absorción máxima hipotética  $a = 1$ .

**Absorción Total en un recinto:**

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

**3.2.3. Materiales porosos**

Generalmente, el coeficiente de absorción acústica de los materiales varía con la frecuencia del sonido (bandas de octava 125-250-500-1000-2000 Hz).

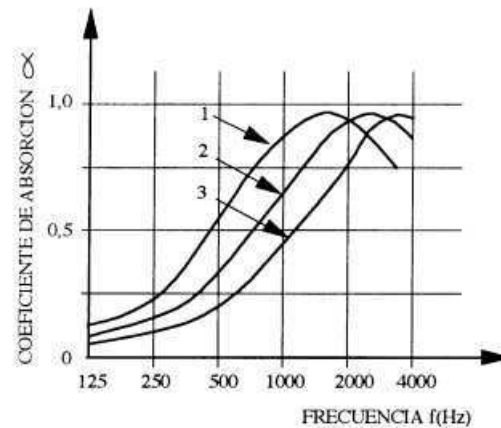


Figura 3.11: Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia para fieltro con diferentes porosidades.

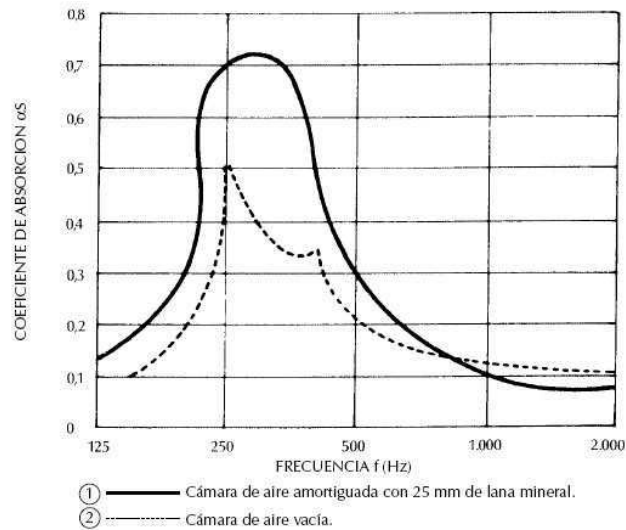
Los materiales porosos causan una disipación de la energía sonora en calor por fricción. Existe una relación entre el espesor del material y la longitud de onda. En este grupo están los yesos, lanas de vidrio, lanas de roca, fieltros, etc.



Figura 3.12: Imagen del material poroso sonex clásico.

### 3.2.4. Placas Vibrantes

Membradas fijadas en su perímetro, estimuladas a vibrar por la onda sonora, trasformando 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 3.13: Ejemplo de curva de coeficiente de absorción de placas vibrantes.



Figura 3.14: Resonadores de membranas.

### 3.2.5. 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.

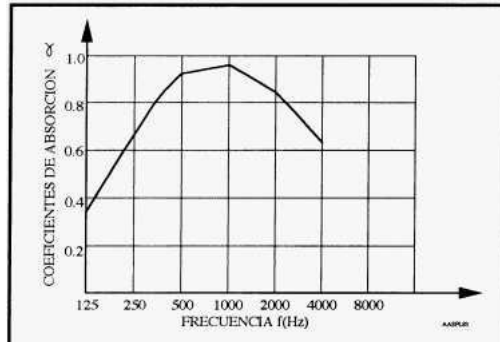


Figura 3.15: Curva de resonador de Helmholtz.

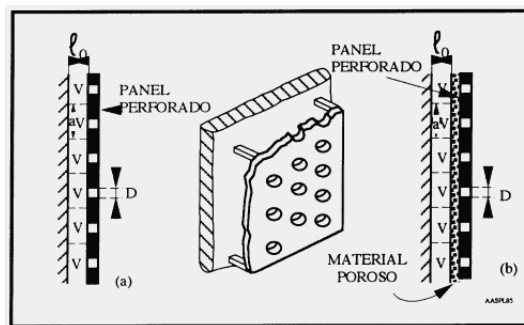


Figura 3.16: Esquema de un resonador de Helmholtz.

### 3.3. Coeficientes de algunos materiales

La siguiente tabla presenta los coeficientes de absorción de algunos materiales en función de la frecuencia.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
contrachapado de madera 6mm con 80mm de cavidad de aire rellena con absorbente	0.60	0.30	0.10	0.09	0.09
pared de ladrillo	0.025	0.025	0.03	0.04	0.05
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

## 3.4. Aislación sonora

### 3.4.1. 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  $6\text{dB}$  por duplicación de masa. También hay un aumento de aislamiento en función de la frecuencia de  $6\text{dB}$  por octava.

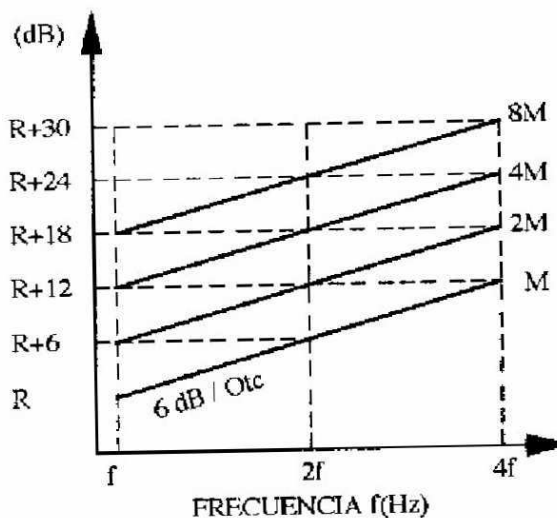


Figura 3.17: Ley de masa en una pared simple.

Lamentablemente esta ley de masa no se mantiene para todas las frecuencias, siendo que el cerramiento sufre deformaciones en su forma de vibrar. En ciertas frecuencias resonantes la vibración será mayor. La experiencia muestra que para frecuencias inferiores a la de resonancia el cerramiento no sigue la ley de masa. En frecuencias superiores (el doble de  $f_r$ ), se mantiene la ley de masa hasta cierta frecuencia donde vuelve a disminuir la aislamiento.

- aislamiento mayor - aumento del peso del cerramiento.
- aislamiento de un sistema se define por su lado más débil.

### 3.4.2. 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. En la figura 3.18 se observa un esquema de suelo flotante y cielorraso suspendido.

La siguiente tabla presenta los índices de reducción sonora de algunos cerramientos.

Cerramiento	Reducción aproximada
Pared de 45 cm de ladrillo macizo	55 dB
Pared de 6 cm de ladrillo hueco	35 dB
Vidrio fijo de 6mm sellada en todo el borde	30 dB

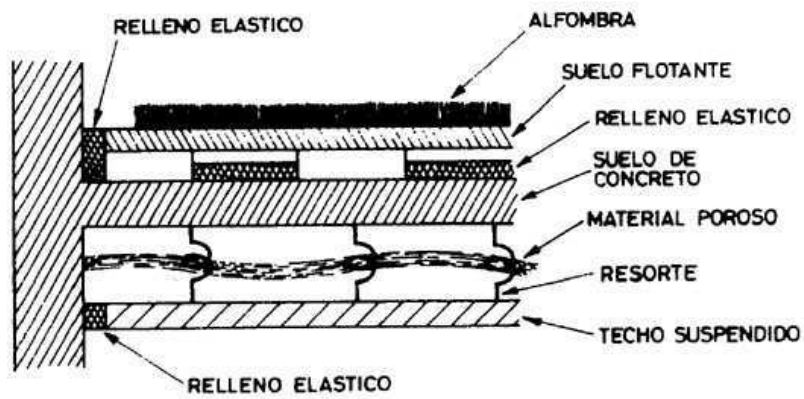


Figura 3.18: Detalle de techo flotante y suelo suspendido.

### 3.4.3. Ejemplo práctico: sala para el eMe

Finalmente se presentan imágenes de la construcción del estudio del eMe, como ejemplo práctico de algunos de los conceptos vistos.



Figura 3.19: Vidrio doble exterior.



Figura 3.20: Detalle doble ventana.



Figura 3.21: Cielorraso en zig-zag.

# Bibliografía

- [1] Conrado Silva De Marco, *Elementos de Acústica Arquitectónica*, Nobel - San Pablo, 1982, Segunda edición 1986
- [2] Higinio Arau, *ABC de la acústica arquitectónica*, Ceac - España, 1999