

Capítulo 4

Acústica Arquitectónica

4.1. Introducción

La **Acústica Arquitectónica** estudia los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de concierto o un estudio de grabación. Esto involucra también el problema de la aislación acústica.

Las habitaciones o salas dedicadas a una aplicación determinada (por ejemplo para la grabación de música, para conferencias o para conciertos) deben tener cualidades acústicas adecuadas para dicha aplicación. Por **cualidades acústicas** de un recinto entendemos una serie de propiedades relacionadas con el comportamiento del sonido en el recinto, entre las cuales se encuentran las reflexiones tempranas, la reverberación, la existencia o no de ecos y resonancias, la cobertura sonora de las fuentes, etc.

4.2. Ecos

El fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido es el **eco**, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos **100 ms** (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo **t** relacionado con la distancia **d** a la superficie más próxima por la expresión

$$t = \frac{2d}{c},$$

donde **c** es la velocidad del sonido, es decir **345 m/s**. El factor **2** se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie. De esta fórmula se deduce que para tener un eco la superficie más próxima debe estar a unos **17 m**. Cuando hay *dos* paredes paralelas algo distantes se puede producir un eco repetitivo.

4.3. Reflexiones tempranas

Cuando la fuente sonora está rodeada por varias superficies (piso, paredes, techo) un oyente recibirá el sonido directo, y además el sonido reflejado en cada pared. Las

primeras reflexiones recibidas, que se encuentran bastante separadas en el tiempo, se denominan **reflexiones tempranas**. Esta situación se ilustra en la **Figura 4.1**.

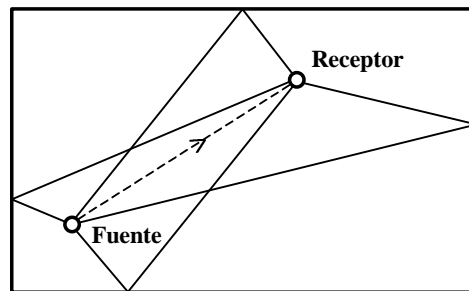


Figura 4.1. En línea de puntos, el sonido directo. En líneas llenas, algunas de las primeras reflexiones o **reflexiones tempranas**.

En salas no demasiado grandes, las primeras reflexiones están bastante cerca en el tiempo unas de otras, de manera que no se llegan a percibir como eco.

4.4. Ambiencia

La distribución en el tiempo de las reflexiones tempranas crea la sensación de **ambiencia**, es decir la sensación que permite al oyente identificar auditivamente el espacio en el que se encuentra. Las personas no videntes desarrollan una especial habilidad para interpretar la información espacial contenida en la ambiencia.

Arquitectónicamente, el control de la ambiencia se puede lograr mediante un cuidadoso diseño que involucra trazar, sobre un plano de la sala, “rayos” acústicos similares a los de la **Figura 4.1**, medir cuidadosamente sus recorridos, y de allí determinar los tiempos de llegada de las correspondientes reflexiones. Hoy en día este trabajo se realiza con el auxilio de computadoras digitales y programas adecuados.

4.5. Absorción sonora

Las superficies de un recinto reflejan sólo parcialmente el sonido que incide sobre ellas; el resto es absorbido. Según el tipo de material o recubrimiento de una pared, ésta podrá absorber más o menos el sonido, lo cual lleva a definir el **coeficiente de absorción sonora**, abreviado con la letra griega α (alfa), como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} .$$

El coeficiente de absorción tiene una gran importancia para el comportamiento acústico de un ambiente, y por esa razón se han medido y tabulado los coeficientes de

absorción para varios materiales y objetos. En general, los materiales duros, como el hormigón o el mármol, son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.

En la **Tabla 4.1** se dan los valores de α para varios materiales típicos de construcción, objetos y personas (ya que las personas también absorben el sonido). Se proporcionan para varias frecuencias, ya que α depende bastante de la frecuencia. En general la absorción aumenta con la frecuencia, debido a que para frecuencias altas la longitud de onda es pequeña y entonces las irregularidades de la superficie o el propio espesor del material son más comparables con la longitud de onda. En algunos casos, sin embargo, algún fenómeno de resonancia entre el material y la pared puede mejorar la absorción en bajas frecuencias.

4.6. Tiempo de reverberación

Después del periodo de las reflexiones tempranas, comienzan a aparecer las reflexiones de las reflexiones, y las reflexiones de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente, dando origen a una situación muy compleja en la cual las reflexiones se densifican cada vez más. Esta permanencia del sonido aún después de interrumpida la fuente se denomina **reverberación**.

Ahora bien; en cada reflexión, una parte del sonido es absorbido por la superficie, y otra parte es reflejada. La parte absorbida puede transformarse en minúsculas cantidades de calor, o propagarse a otra habitación vecina, o ambas cosas. La parte reflejada mantiene su carácter de sonido, y viajará dentro del recinto hasta encontrarse con otra superficie, en la cual nuevamente una parte se absorberá y otra parte se reflejará. El proceso continúa así hasta que la mayor parte del sonido sea absorbido, y el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible, es decir, se extinga.

Para medir cuánto demora este proceso de extinción del sonido se introduce el concepto de **tiempo de reverberación, T**, técnicamente definido como *el tiempo que demora el sonido en bajar 60 dB por debajo de su nivel inicial* (se ha elegido **60 dB** porque con esa caída se tiene la sensación de que el sonido se ha extinguido completamente). En algunas publicaciones se suele representar también este valor con el símbolo **RT₆₀**, formado por la sigla en inglés de *reverberation time* (tiempo de reverberación), seguida por la referencia a los **60 dB**. Otra abreviatura es **T₆₀**.

Como ejemplo, si al interrumpir un sonido de **90 dB** éste se reduce a **30 dB** en **3 s**, entonces será **T = 3 s**. Salvo para sonidos inicialmente muy intensos, antes de caer **60 dB** el sonido se vuelve inaudible por quedar enmascarado por el ruido de fondo o ruido ambiente.

El tiempo de reverberación depende de cuán absorbentes sean las superficies de la sala. Así, si las paredes son muy reflectoras (es decir que reflejan la mayor parte del sonido que llega a ellas), se necesitarán *muchas reflexiones* para que se extinga el sonido, y entonces **T** será grande. Si, en cambio, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta del sonido, por lo tanto en unas pocas reflexiones el sonido será prácticamente inaudible, por lo cual **T** será pequeño. Dado que los materiales duros, como el hormigón o los azulejos, son poco absorbentes del sonido, un ambiente con paredes de este tipo tendrá un tiempo de reverberación largo. Una sala

cubierta con materiales absorbentes como cortinados, alfombras, etc., por el contrario, tendrá un tiempo de reverberación corto.

Tabla 4.1. Coeficientes de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia (según varias fuentes).
Los valores no suministrados no estaban disponibles.

| Material | Coeficiente de absorción α a la frecuencia | | | | | |
|---|---|------|------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 |
| Hormigón sin pintar | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,04 |
| Hormigón pintado | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Ladrillo visto sin pintar | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| Ladrillo visto pintado | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Revoque de cal y arena | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,06 |
| Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm | 0,29 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,09 |
| Yeso sobre metal desplegado | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,03 |
| Mármol o azulejo | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Madera en paneles (a 5 cm de la pared) | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 |
| Madera aglomerada en panel | 0,47 | 0,52 | 0,50 | 0,55 | 0,58 | 0,63 |
| Parquet | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| Parquet sobre asfalto | 0,05 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,10 | 0,22 |
| Parquet sobre listones | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,07 |
| Alfombra de goma 0,5 cm | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,03 | 0,10 |
| Alfombra de lana 1,2 kg/m ² | 0,10 | 0,16 | 0,11 | 0,30 | 0,50 | 0,47 |
| Alfombra de lana 2,3 kg/m ² | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,50 | 0,63 | 0,83 |
| Cortina 338 g/m ² | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,17 | 0,24 | 0,35 |
| Cortina 475 g/m ² fruncida al 50% | 0,07 | 0,31 | 0,49 | 0,75 | 0,70 | 0,60 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm | 0,11 | 0,14 | 0,36 | 0,82 | 0,90 | 0,97 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm | 0,15 | 0,25 | 0,50 | 0,94 | 0,92 | 0,99 |
| Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm | 0,17 | 0,44 | 0,99 | 1,03 | 1,00 | 1,03 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm | 0,06 | 0,20 | 0,45 | 0,71 | 0,95 | 0,89 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm | 0,07 | 0,32 | 0,72 | 0,88 | 0,97 | 1,01 |
| Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm | 0,13 | 0,53 | 0,90 | 1,07 | 1,07 | 1,00 |
| Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 25 mm | 0,15 | 0,25 | 0,40 | 0,50 | 0,65 | 0,70 |
| Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 50 mm | 0,25 | 0,45 | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,85 |
| Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 25 mm | 0,20 | 0,40 | 0,80 | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 50 mm | 0,30 | 0,75 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Ventana abierta | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Vidrio | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,04 |
| Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm | – | 0,80 | 0,71 | 0,86 | 0,68 | – |
| Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm | – | 0,72 | 0,61 | 0,68 | 0,79 | – |
| Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm | – | 0,70 | 0,61 | 0,70 | 0,78 | – |
| Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm | – | 0,72 | 0,62 | 0,69 | 0,78 | – |
| Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) 5/8" | 0,34 | 0,36 | 0,71 | 0,85 | 0,68 | 0,64 |
| Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) 5/8" | 0,31 | 0,32 | 0,51 | 0,72 | 0,74 | 0,77 |
| Asiento de madera (0,8 m ² /asiento) | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,08 |
| Asiento tapizado grueso (0,8 m ² /asiento) | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Personas en asiento de madera (0,8 m ² /persona) | 0,34 | 0,39 | 0,44 | 0,54 | 0,56 | 0,56 |
| Personas en asiento tapizado (0,8 m ² /persona) | 0,53 | 0,51 | 0,51 | 0,56 | 0,56 | 0,59 |
| Personas de pie (0,8 m ² /persona) | 0,25 | 0,44 | 0,59 | 0,56 | 0,62 | 0,50 |

La propiedad anterior se puede expresar por medio de una fórmula, denominada **fórmula de Sabine**, en honor al físico norteamericano que la obtuvo a principios de este siglo. Según dicha fórmula el tiempo de reverberación T puede calcularse como:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S},$$

donde V es el volumen de la habitación en m^3 , S es el área de su superficie interior total en m^2 , y α es el coeficiente de absorción sonora, ya definido como la fracción de la energía sonora incidente que es absorbida por las superficies de la habitación.

Como ejemplo, supongamos una sala rectangular de **4 m** de ancho, por **6 m** de largo, por **3 m** de alto. Entonces

$$S = 4 \times 3 + 4 \times 3 + 6 \times 3 + 6 \times 3 + 4 \times 6 + 4 \times 6 = 108 \text{ m}^2$$

$$V = 4 \times 3 \times 6 = 72 \text{ m}^3$$

Si $\alpha = 0,1$ (las superficies absorben el **10%** de la energía sonora incidente), resulta

$$T = 0,161 \cdot \frac{72}{0,1 \times 108} = 1,07 \text{ s}$$

Dado que, según vimos, los coeficientes de absorción α dependen de la frecuencia, resulta también que el tiempo de reverberación depende de la frecuencia.

En general, los recintos están formados por diversos materiales, cuyos coeficientes de absorción no tienen por qué ser iguales. Si una sala tiene una parte S_1 de su superficie con coeficiente α_1 , otra parte S_2 con coeficiente α_2 , ... y por último una parte S_n con coeficiente α_n , entonces

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}$$

Por ejemplo, si en el caso anterior las paredes tienen $\alpha = 0,1$, en tanto que el techo tiene un cielorraso acústico con $\alpha = 0,6$ y el piso $\alpha = 0,15$, resulta

$$T = 0,161 \cdot \frac{72}{0,1 \cdot 60 + 0,6 \cdot 24 + 0,15 \cdot 24} = 0,48 \text{ s}$$

Vemos cómo el uso del cielorraso acústico redujo considerablemente el tiempo de reverberación.

4.7. Tiempo de reverberación óptimo

Varias investigaciones realizadas evaluando las acústicas de las mejores salas del mundo (según la opinión de las audiencias o usuarios y de expertos) han revelado que

para cada finalidad existe *un tiempo de reverberación óptimo*, que aumenta al aumentar el volumen en m^3 de la sala. En la **Figura 4.2** se muestra el resultado de uno de estos estudios. Debe aclararse que *no hay coincidencia* entre los resultados presentados por diversos investigadores, aunque cualitativamente son similares.

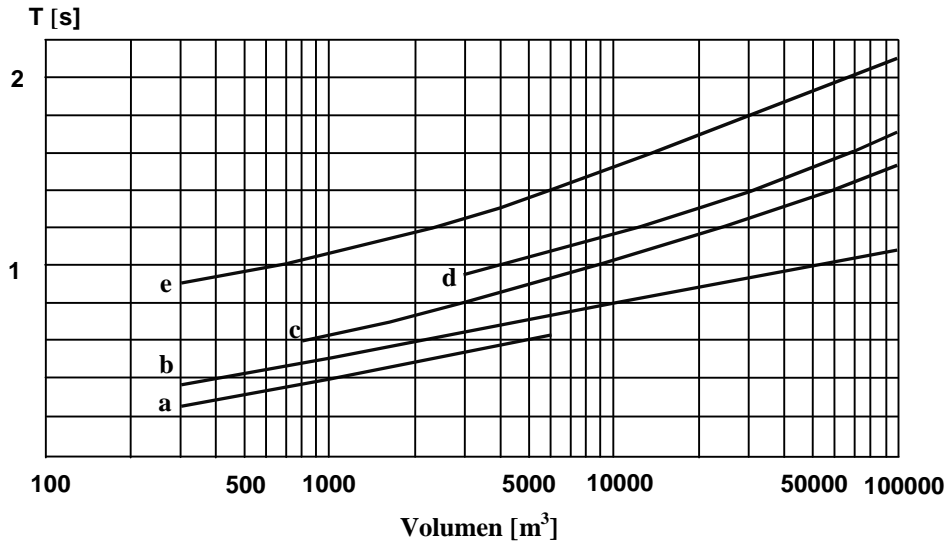


Figura 4.2. Tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala (según L. L. Beranek). (a) Estudios de radiodifusión para voz. (b) Salas de conferencias. (c) Estudios de radiodifusión para música. (d) Salas de conciertos. (e) Iglesias.

En general, se observa que la palabra requiere menores tiempos de reverberación que la música, debido a que la parte más significativa de la palabra son las consonantes, que son a la vez débiles y más cortas que las vocales. En consecuencia, con un tiempo de reverberación alto las vocales se prolongan demasiado, enmascarando a las consonantes que les siguen, lo que reduce la inteligibilidad de la palabra. La música, por el contrario, *se beneficia* con un tiempo de reverberación considerable, ya que éste permite empalmar mejor los sonidos y disimular pequeñas imperfecciones de ejecución, a la vez que aporta una espacialidad que es deseable en la música.

Como ejemplo de aplicación, supongamos un pequeño teatro de **10 m** de ancho por **12 m** de fondo por **6 m** de altura, que va a ser utilizado para obras de teatro. El volumen de la sala será

$$V = 10 \times 12 \times 6 = 720 \text{ m}^3 ,$$

lo cual significa, eligiendo la curva **b** de la **Figura 4.2**, que el tiempo de reverberación óptimo será de **0,45 s**. De la fórmula del tiempo de reverberación es posible calcular el valor de α necesario para obtener este tiempo óptimo:

$$\alpha = 0,161 \cdot \frac{V}{T \cdot S}$$

Teniendo en cuenta que

$$S = 12 \times 10 + 12 \times 10 + 12 \times 6 + 12 \times 6 + 10 \times 6 + 10 \times 6 = 504 \text{ m}^2 ,$$

resulta

$$\alpha = 0,161 \cdot \frac{720}{0,45 \cdot 504} = 0,51 .$$

Este valor es bastante elevado, lo cual significa que el tratamiento acústico resultará costoso, situación bastante común en la arquitectura acústica. El tratamiento acústico suele ser *casi tan costoso como la construcción del edificio*.

4.8. Campo sonoro directo y reverberante

Un segundo elemento que interviene en la acústica de un ambiente es cómo se distribuye en él el **campo sonoro**. 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**. El **campo directo** contiene la parte del sonido que acaba de ser emitido por la fuente, y que por lo tanto *aún no experimentó ninguna reflexión*, y el **campo reverberante**, en cambio, incluye el sonido *después de la primera reflexión*.

Estas dos componentes tienen comportamientos muy diferentes. El campo directo disminuye con la distancia a la fuente, y lo hace a razón de **6 dB** por cada duplicación de la distancia. Así, si a **1 m** de una fuente sonora se mide un nivel de presión sonora de **80 dB**, a **2 m** (el doble de **1 m**) tendremos **74 dB**; a **4 m** (el doble de **2 m**) habrá **68 dB**; a **8 m** (el doble de **4 m**) existirá un campo directo de **62 dB**, y así sucesivamente.

El campo reverberante, en cambio, es *constante* en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas y otros recintos. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones, y todas ellas se superponen entre sí, resultando una *distribución prácticamente uniforme* del sonido.

En el descampado, donde el sonido puede propagarse libremente sin que se produzcan reflexiones, *sólo existe la componente de campo directo*. Por esta razón, el nivel de presión sonora disminuye rápidamente con la distancia. Así, una persona hablando normalmente a **50 m** se escuchará sólo muy débilmente. En un ambiente cerrado, en cambio, si bien muy cerca de la fuente predomina el campo directo, a cierta distancia predomina el campo reverberante.

En la **Figura 4.3** se ilustran ambas componentes de la presión sonora y el campo sonoro resultante de la superposición de ambas. Existe una distancia denominada **distancia crítica** que limita las regiones en las que predomina uno u otro campo. Para distancias menores que la distancia crítica, predomina el campo directo, y para distancias mayores, predomina el campo reverberante. Por esta razón se suele denominar también **campo cercano** y **campo lejano** a las componentes directa y reverberante.

Una característica del campo directo es que es bastante **direccional**, mientras que el campo reverberante es **difuso**, es decir **adireccional**. Por esta razón, en un teatro, cerca del escenario se percibe claramente la procedencia de los sonidos, pero más lejos no tanto (aunque por efecto Haas, el sonido directo, que llega siempre primero, permite percibir la dirección del sonido aún con un importante campo reverberante).

El campo reverberante permite explicar por qué dentro de una habitación los sonidos se perciben con mayor sonoridad que en un ámbito abierto. En éste último sólo existe el campo directo. En una habitación el sonido se ve *reforzado* por el campo reverberante, que *acumula la energía sonora que no es absorbida en las reflexiones*. En el descampado, al no haber reflexiones, la energía sonora simplemente se aleja continuamente de la fuente, *sin posibilidad de acumularse*.

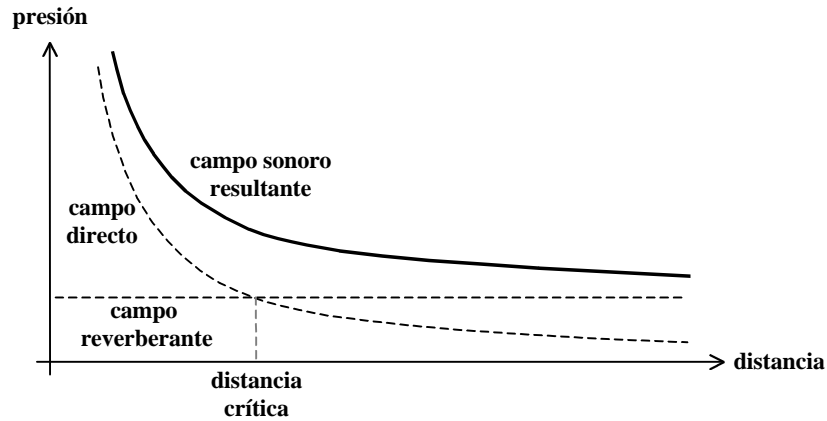


Figura 4.3. Campo directo y campo reverberante. Se indica también la distancia crítica, que limita las regiones donde predomina una u otra componente del campo sonoro.

De la discusión anterior se desprende que el campo reverberante será tanto mayor cuanto más reflectoras del sonido sean las superficies de un ambiente (o, lo que es lo mismo, cuanto menor sea el coeficiente de absorción), ya que en ese caso será mayor la energía acumulada. Como también el tiempo de reverberación aumenta cuando aumenta la reflexión, resulta que *a mayor tiempo de reverberación, mayor campo reverberante*.

Esto explica por qué en los ambientes con paredes duras, como los gimnasios, a igualdad de la fuente el nivel sonoro es tan alto. A esto se agrega el hecho de que el campo reverberante tiende a enmascarar el habla, por lo que la gente inconscientemente sube la voz para aumentar el campo directo, y poder comunicarse por lo menos con las personas más próximas. Esto a su vez incrementa el campo reverberante, pues significa más energía sonora para acumular en el ambiente.

4.9. Resonancias

En las salas pequeñas, aparece un tercer elemento que incide en la calidad acústica, que son las **resonancias** o **modos normales de vibración**. Esto sucede como consecuencia de las reflexiones sucesivas en paredes opuestas. Si en una habitación se genera una onda sonora que viaja perpendicularmente a dos paredes enfrentadas, al reflejarse en una de ellas lo hará también perpendicularmente, de modo que volverá sobre sí misma y posteriormente se reflejará en la pared opuesta. Así, se generará lo que se denomina una **onda estacionaria**, es decir una onda que va y vuelve una y otra vez entre las

dos paredes. Esta onda es, de hecho, una onda sonora que se escuchará precisamente como un sonido. Si la distancia entre las dos paredes es L , la longitud de tal onda es $2 \cdot L$, y por consiguiente deberá cumplirse (según lo visto en la sección 1.1) que

$$2 \cdot L = \frac{c}{f} ,$$

donde c es la velocidad del sonido (**345 m/s**) y f la frecuencia del sonido resultante. De aquí se puede obtener la frecuencia, que resulta ser

$$f = \frac{c}{2 \cdot L} .$$

Como ejemplo, supongamos que las paredes distan unos **3 m** entre sí. Entonces

$$f = \frac{345}{2 \cdot 3} = 57,5 \text{ Hz} ,$$

que corresponde al **si bemol** casi **3** octavas por debajo del **la central** (**LA 440 Hz**). Esta es sólo una de las muchas **frecuencias de resonancia** que puede tener esta sala. Otras corresponden a los armónicos de esa nota (es decir los múltiplos de **57,5 Hz**, como **115 Hz**, **172,5 Hz**, etc.).

¿Qué consecuencias tiene esto para las condiciones acústicas del recinto? Las resonancias se ponen de manifiesto cuando aparece un sonido de igual o similar frecuencia. Por ejemplo, si un bajo ejecuta esta nota, la acústica de la habitación parecerá amplificar dicho sonido, en desmedro de los otros sonidos. A esto se agrega que para las frecuencias de resonancia el tiempo de reverberación es mucho más prolongado, por lo cual dicha nota se prolongará más que las otras. Esto se considera un defecto acústico importante. Entre las posibles soluciones, están: a) evitar las superficies paralelas, que favorecen las resonancias, b) agregar absorción acústica que reduzca el tiempo de reverberación, c) ecualizar el sistema de sonido de modo de atenuar las frecuencias próximas a la resonancia o resaltar las otras frecuencias.

Las resonancias rellenan el espectro musical, lo cual favorece el canto solista, es decir las melodías sencillas y no demasiado rápidas. Por ese motivo resulta agradable cantar en el baño (especialmente para la voz masculina). Es un ambiente pequeño, y por lo tanto con resonancias notorias. Sin embargo, desde el punto de vista de la escucha de la música, no resulta tan agradable, porque distorsiona lo que se quiere escuchar.

Otra consecuencia de las resonancias es que la **difusión** del sonido no es satisfactoria, es decir que la distribución espacial del mismo no es uniforme: en algunos puntos el nivel sonoro es mucho mayor que en otros, siendo la diferencia mayor que la atribuible al campo directo.

A medida que crece el tamaño de una habitación, las resonancias tienden a estar cada vez más próximas entre sí, y se transforman en reverberación, mejorando también la difusión. Lo mismo sucede cuando la forma de la sala es irregular.

En el diseño de pequeñas salas o estudios de grabación o ensayo es primordial prestar atención a los problemas de difusión y de resonancias. Las siguientes son algunas recomendaciones:

1) Evitar las simetrías. Si la habitación tiene forma rectangular, las aristas deberían ser todas de diferente longitud (la forma cúbica de algunas habitaciones es particu-

larmente deficiente desde el punto de vista acústico). Algunas proporciones satisfactorias son $1 : 1,14$: $1,39$, $1 : 1,28$: $1,54$ y $1 : 1,6$: $2,23$.

2) Si es posible, evitar los paralelismos. Esto puede lograrse inclinando una o dos paredes, e inclusive el cielorraso.

3) En casos severos, recubrir con material absorbente una de cada par de paredes paralelas, o mejor aún (aunque es una solución más costosa), colocar algunas baldosas difusoras disponibles comercialmente (por ejemplo las RPG).

4.10. Materiales absorbentes acústicos

Los materiales de construcción y los revestimientos tienen propiedades absorbentes muy variables. A menudo es necesario, tanto en salas de espectáculo como en estudios de grabación y monitoreo realizar tratamientos específicos para optimizar las condiciones acústicas. Ello se logra con materiales absorbentes acústicos, es decir materiales especialmente formulados para tener una elevada absorción sonora.

Existen varios tipos de materiales de esta clase. El más económico es la lana de vidrio, que se presenta en dos formas: como fieltro, y como panel rígido. La absorción aumenta con el espesor, y también con la densidad. Permite absorciones sonoras muy altas. El inconveniente es que debe ser separada del ambiente acústico mediante paneles protectores cuya finalidad es doble: proteger la lana de vidrio de las personas, y a las personas de la lana de vidrio (ya que las partículas que se podrían desprender no sólo lastiman la piel sino que al ser respiradas se acumulan irreversiblemente en los pulmones, con el consecuente peligro para la salud). Los protectores son en general planchas perforadas de Eucatex u otros materiales celulósicos. Es de destacar que salvo las planchas perforadas de gran espesor, no tienen efecto propio en la absorción, por lo tanto las planchas perforadas aplicadas directamente sobre la pared son poco efectivas.

Otro tipo de material son las espumas de poliuretano (poliéster uretano, y poliéster uretano) o de melamina. Son materiales que se fabrican facetados en forma de cuñas anecoicas (**Figura 4.4a**). Esta estructura superficial se comporta como una *trampa de sonido*, ya que el sonido que incide sobre la superficie de una cuña se refleja varias veces en esa cuña y en la contigua. El resultado es un aumento de la superficie efectiva de tres veces o más (**Figura 4.4b**).

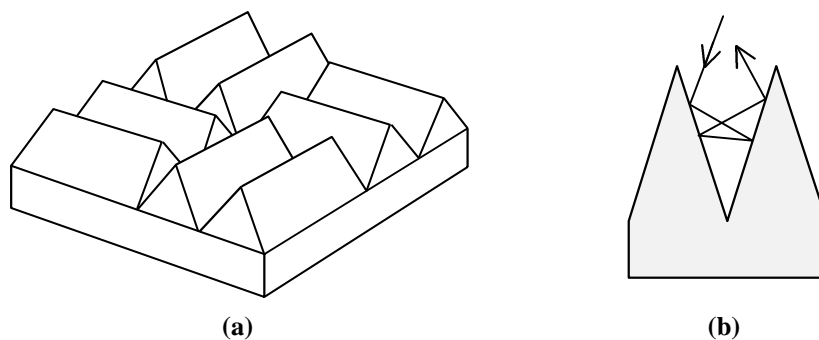


Figura 4.4. (a) Una muestra de material absorbente a base de espumas poliuretánicas con terminación superficial en cuñas anecoicas. (b) Mecanismo por el cual las cuñas anecoicas logran gran absorción sonora.

Para tratamiento acústico de cielorrasos se pueden emplear plafones fonoabsorbentes basados en fibras minerales (basalto), fibra de vidrio, fibras celulósicas, corcho, etc. con diversas terminaciones superficiales de fantasía. En general se instalan suspendidas por medio de bastidores a cierta distancia de la losa. Cuanto mayor es la separación, mejor es la absorción resultante, sobre todo si se intercala algo de lana de vidrio.

Es necesario efectuar aquí dos advertencias. La primera se refiere al poliestireno expandido (telgopor). Si bien es un excelente aislante térmico, *sus características acústicas son muy pobres*, contrariamente a lo que mucha gente supone, y por lo tanto no debería utilizarse en aplicaciones en las que la absorción o la aislación acústica sean críticas. La segunda advertencia es con respecto a la costumbre de recubrir los cielorrasos con cajas de huevos, bajo la creencia de que son buenos absorbentes del sonido. En realidad no son efectivas para esta aplicación, debido a que carecen de la porosidad y el volumen necesarios. Tal vez la confusión se origine en la semejanza que presentan con las cuñas anecoicas. No son recomendables para ninguna aplicación acústica seria.

El tratamiento de pisos se realiza normalmente con alfombras, las cuales son más efectivas si se colocan sobre bajoalfombras porosos de fibra vegetal (arpillera, yute) o poliéster. El efecto de las alfombras no se reduce a absorber el sonido, sino que atenúan los ruidos de pisadas u objetos que caen o rozan el suelo (por ejemplo, cables de micrófonos). A igual estructura, la absorción de una alfombra aumenta con el espesor. El tipo de fibra constitutiva de una alfombra (lana, nylon) no afecta significativamente a su coeficiente de absorción.

Por último, los cortinados también pueden aprovecharse como absorbentes sonoros, especialmente cuando forman parte del diseño arquitectónico con algún fin estético o funcional. Hay que tener en cuenta que a mayor separación de la pared, mayor efectividad en la absorción. También es importante la porosidad, ya que una cortina plástica impermeable no tiene propiedades absorbentes. Por el contrario, una cortina de tela gruesa, de terciopelo, etc., será bastante absorbente. La absorción también aumenta con el plegado, fruncido o drapeado, es decir la relación entre el área efectivamente ocupada por la cortina y el área de la cortina estirada. Una cortina fruncida al **50%** puede llegar casi a duplicar su coeficiente de absorción.

Una aplicación interesante de las cortinas es la obtención de una acústica variable. Para ello se coloca una cortina frente a una pared relativamente reflectora. Al correr la cortina se va descubriendo la pared, y el conjunto se vuelve menos absorbente.

4.11. Aislación acústica

Aislar acústicamente un recinto significa impedir que los sonidos generados dentro del mismo trasciendan hacia el exterior y, recíprocamente, que los ruidos externos se perciban desde su interior.

La **aislación acústica** (o **aislación sonora**) es muy importante en todo lo que tenga que ver con sonido profesional. Si el recinto es una sala de concierto o de espectáculos en la cual se ejecuta o propala música a alto nivel sonoro, es preciso evitar que los sonidos trasciendan convirtiéndose en ruidos molestos al vecindario. Si se trata de una sala de grabación o un estudio radiofónico, cualquier ruido proveniente del exterior contaminará el sonido que se desea difundir o grabar, en desmedro de su calidad, lo cual también debe evitarse.

En una primera aproximación al problema, podemos observar que la aislación sonora se logra interponiendo una pared o tabique entre la *fente sonora* y el *receptor*. La aislación es tanto mayor cuanto mayor sea la densidad superficial (kg/m^2) del tabique y cuanto mayor sea la frecuencia del sonido. Esta es la razón por la cual las paredes gruesas (y por lo tanto pesadas) ofrecen mayor aislación que las delgadas. También explica por qué de la música del vecino se escucha mucho más la base rítmica de la percusión grave (baja frecuencia) que las melodías, por lo general más agudas (alta frecuencia).

Un análisis más detallado indica que es posible obtener una mayor aislación acústica por medio de tabiques dobles, o, más generalmente, múltiples. En otras palabras, dada una cantidad de material (por ejemplo **20 cm** de espesor de hormigón) podemos sacarle mayor provecho si lo dividimos en dos partes (en este caso dos paredes de **10 cm** cada una) y lo separamos con un espacio de aire. Si el espacio de aire se rellena con algún material absorbente (típicamente, lana de vidrio), el resultado es una aislación todavía mayor.

Este tipo de estructura se utiliza mucho con placas de roca de yeso (Durlock, Placo, Pladur). Estas placas están formadas por yeso recubierto a ambos lados por celulosa (cartón). El espesor es, normalmente, unos **12 mm**, y se suelen usar de a **2** separadas **50**, **70** ó **90 mm** mediante perfiles de chapa. El espacio entre ambas placas se rellena con lana de vidrio (**Figura 4.5a**). La aislación que se logra es sorprendente para el espesor y el peso total. Se puede obtener mayor aislación aún utilizando dos placas de roca de yeso de cada lado, y montándolas sobre perfiles independientes para evitar las conexiones rígidas propensas a transmitir las vibraciones (estructura alternada, **Figura 4.5b**).

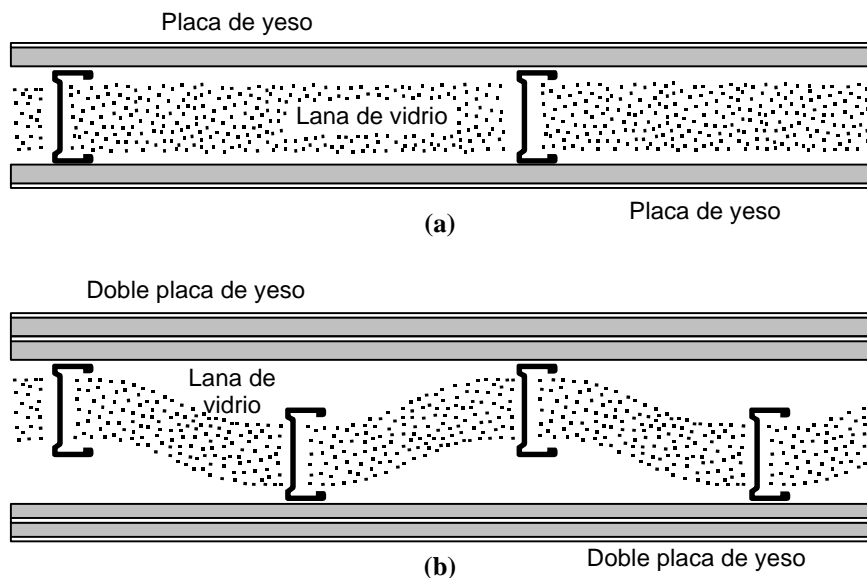


Figura 4.5. (a) Vista superior en corte de un montaje de placas de roca de yeso con estructura formada por perfiles de chapa. (b) Estructura alternada sin conexión rígida. Notar la diferencia de espesores a uno y otro lado de la pared.

También se utiliza el concepto de tabique doble para construir ventanas de gran aislación sonora, como las “peceras” que separan la sala de control de la sala de graba-

ción de los estudios. En este caso se utilizan dos hojas de vidrio grueso de distintos espesores (por ejemplo **6 mm** y **8 mm**), fijados al marco mediante masillas no endurecibles de silicona. En los bordes interiores (en forma más o menos oculta) se coloca material absorbente, como lana de vidrio o espuma de poliuretano. Para evitar que por diferencias de temperatura se produzcan condensaciones por dentro, lo cual empañaría los vidrios, se colocan gránulos de **sílica gel**, un poderoso deshumectante. En la **Figura 4.6** se muestra la estructura de una ventana de este tipo.

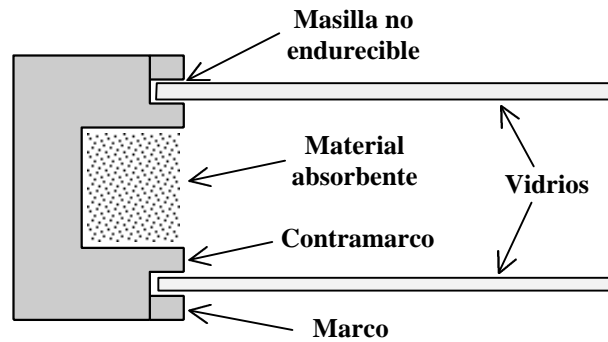


Figura 4.6. Corte según un plano horizontal de una ventana de doble vidrio. Obsérvese el diferente espesor de los vidrios.

Para catalogar la aislación sonora de diferentes materiales y estructuras se usan dos parámetros: la **pérdida de transmisión, PT**, y la **clase de transmisión sonora, STC** (Estados Unidos), o el **índice de reducción acústica, R_w** (Europa y Argentina).

La **pérdida de transmisión, PT**, es un parámetro expresado en **dB** que depende de la frecuencia e indica en cuánto se atenúa la *energía sonora* incidente al atravesar el tabique. Así, una pérdida de transmisión de **40 dB** significa que la energía sonora que pasa al otro lado es **40 dB** menor que la incidente.

Obsérvese que se está hablando de la *energía sonora*, que no es lo mismo que la *presión sonora*. Si un tabique tiene **PT = 40 dB**, y del lado de la fuente hay un nivel de presión sonora de **90 dB**, *no es válido* afirmar que del otro lado hay **90 dB - 40 dB**, es decir **50 dB**. Puede haber menos o más de **50 dB**, según las circunstancias. Por ejemplo, si el lado receptor es muy reverberante, habrá más de **50 dB**; y si el tabique es muy pequeño, por ejemplo una pequeña ventanilla en el medio de una pared muy gruesa, entonces del lado receptor habrá probablemente menos de **50 dB**. Si bien el análisis detallado no es muy complejo, escapa al objeto de este libro.

La **clase de transmisión sonora** (en inglés, sound transmission class), **STC**, es una especie de valor promedio de la pérdida de transmisión a varias frecuencias. Es un valor único que permite evaluar rápidamente la calidad de la aislación sonora que ofrece un tabique, especialmente en lo referido a la privacidad de la palabra. Así, un valor de **STC** inferior a **25** implica que la voz normal se entiende perfectamente, y un valor superior a **45** implica que la voz alta casi no se percibe. El índice de reducción sonora **R_w** es la versión europea, también usada en la Argentina (puede diferir hasta en **1 dB**).

En la **Tabla 4.2** se detallan los valores de **PT** a varias frecuencias y de **STC**, correspondientes a varios materiales y estructuras. Se han considerado los materiales y

estructuras actuando en condiciones casi ideales. No se ha tenido en cuenta, por consiguiente, la denominada **transmisión por flancos**, es decir el sonido que se filtra a través de fisuras, intersticios o juntas mal selladas, o que se propaga por la estructura en forma de vibraciones, o que se transmite por tuberías de ventilación o aire acondicionado, o por los caños de distribución de energía eléctrica. En todo proyecto de aislación acústica deben tenerse en cuenta todos estos detalles, ya que de lo contrario se corre el riesgo de invertir grandes sumas de dinero sin lograr los resultados esperados. Es importante saber que el intersticio debajo de una puerta puede llegar a empeorar la atenuación de una pared en **20 dB** ó más. Pueden utilizarse burletes perimetrales en las puertas y masilla con silicona (es decir, no endurecible) en toda fisura, grieta o junta.

Por último, debe advertirse que la información brindada en este capítulo se ha incluido a título informativo, siendo conveniente obtener una opinión especializada antes de encarar un proyecto que involucre grandes inversiones, ya que es muy fácil cometer errores que luego se pagarán, a la larga o a la corta, muy caro.

Tabla 4.2. Pérdida de transmisión de diversos materiales en función de la frecuencia, y clase de transmisión sonora (según varias fuentes).

| Material o estructura | STC | PT a la frecuencia | | | | | |
|---|-----|--------------------|-----|-----|------|------|------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Hormigón (90 mm) | 37 | 30 | 30 | 37 | 35 | 38 | 41 |
| Hormigón (140 mm) | 45 | 30 | 34 | 41 | 48 | 56 | 55 |
| Hormigón (190 mm) | 53 | 37 | 46 | 46 | 54 | 59 | 60 |
| Hormigón (290 mm) | 50 | 33 | 41 | 45 | 51 | 57 | 61 |
| Hormigón (90 mm) + aire (25 mm) + fibra de vidrio (65 mm) + hormigón (90 mm) + placa de yeso (16 mm) | 62 | 49 | 54 | 57 | 66 | 71 | 81 |
| Placa de yeso (Durlock) (12 mm) | 28 | 15 | 20 | 25 | 29 | 32 | 27 |
| Placa de yeso (Durlock) (2×12 mm) | 31 | 19 | 26 | 30 | 32 | 29 | 37 |
| Placa de yeso (12 mm) + aire (90 mm) + placa de yeso (12 mm) | 33 | 12 | 23 | 32 | 41 | 44 | 39 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (90 mm) + placa de yeso (12 mm) | 37 | 16 | 26 | 36 | 42 | 45 | 48 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (70 mm) + placa de yeso (2×12 mm) | 45 | 23 | 30 | 45 | 49 | 52 | 52 |
| Placa de yeso (12 mm) + aire (20 mm) + fibra de vidrio (50 mm) + placa de yeso (12 mm) | 45 | 21 | 35 | 48 | 55 | 56 | 43 |
| Placa de yeso (2×12 mm) + aire (40 mm) + fibra de vidrio (50 mm) + placa de yeso (2×12 mm) | 55 | 34 | 47 | 56 | 61 | 59 | 57 |
| Vidrio (6 mm) | 31 | 25 | 28 | 31 | 34 | 30 | 37 |
| Vidrio laminado (6 mm) | 35 | 26 | 29 | 32 | 35 | 35 | 43 |
| Vidrio (3mm) + aire (50 mm) + vidrio (3 mm) | 38 | 18 | 26 | 38 | 43 | 48 | 35 |
| Vidrio (3mm) + aire (100 mm) + vidrio (6 mm) | 45 | 29 | 35 | 44 | 46 | 47 | 50 |
| Puerta madera maciza (24 kg/m ²) sin burlete | 22 | 19 | 22 | 26 | 24 | 23 | 20 |
| Puerta madera maciza con burlete | 26 | 22 | 25 | 29 | 25 | 26 | 28 |
| Puerta de madera maciza (24 kg/m ²) + aire (230 mm) + Puerta acero chapa # 18 hueca (26 kg/m ²) + burlete magnético en el marco | 49 | 35 | 44 | 48 | 44 | 54 | 62 |