

**c) VIBRACIONES Y ONDAS:****5. ACÚSTICA DE RECINTOS****5.1. INTRODUCCIÓN**

Cuando el sonido se propaga en un recinto incide sobre las paredes, techo, suelo y objetos que están en su interior. Parte de esta energía es reflejada al recinto, siendo la causa de la acústica del recinto y también de la complejidad del campo sonoro en el mismo. El estudio de las leyes de propagación de las ondas acústicas en presencia de obstáculos es enrevesado y en la práctica es muy difícil determinar con precisión la evolución del campo acústico en el interior de un recinto.

El sonido producido por una fuente sonora que incide sobre las superficies límites del mismo y se refleja tiende a aumentar el nivel de presión acústica en el recinto. El campo sonoro dentro del recinto está formado por dos partes:

- **Sonido directo:** que va desde fuente al observador, siendo el mismo que tenemos bajo las condiciones de campo libre.
- **Campo sonoro reverberante:** sonidos reflejados que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies. Está formado por todas las ondas acústicas que se han reflejado al menos una vez.

Cuando una fuente emite en un recinto, las superficies interiores proporcionan la oyente un nivel de presión acústica combinación del campo acústico directo de la fuente y de las ondas acústicas reflejadas. Por lo tanto, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado. La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora. La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante y a ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora.

La duración del proceso de reverberación en un recinto tiene una gran importancia sobre la calidad del sonido en el mismo. A lo largo de los años se han ido elaborando una serie de criterios experimentales para fijar los tiempos

**5.2. COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y ABSORCIÓN**

En Acústica Arquitectónica cuando la energía acústica incide sobre la superficie, la parte de la energía no reflejada se dice que es absorbida a través de la superficie de separación. Es decir, absorción en nuestro caso es sinónimo de asimilación de energía por parte de la superficie, transformándose la energía sonora en otra forma de energía como mecánica, calorífica.... Es de gran interés práctico para el control del campo acústico en un recinto, el conocimiento de la absorción acústica de los materiales de acabado, objetos y ocupantes. Para cada uno de ellos se define el coeficiente de reflexión  $\alpha_r$  y absorción  $\alpha$ .

Cuando una onda de presión se desplaza e incide normalmente sobre el plano de separación de dos medios diferentes una parte es reflejada y otra absorbida o transmitida. El coeficiente de reflexión  $\alpha_r$  se define como el cociente entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i}$$

A toda la energía no reflejada se dice que es absorbida a través de la superficie de separación, y se define el coeficiente de absorción  $\alpha$  de la superficie de separación a incidencia normal de la siguiente forma:

$$\alpha = 1 - \alpha_r = \frac{I_i - I_r}{I_i}$$

Así por ejemplo una superficie muy lisa y dura tendrá un  $\alpha$  muy pequeño ya que la mayor parte de la energía se reflejará, mientras que un material blando y poroso tendrá un coeficiente de absorción muy cercano a la unidad.

### 5.3. EL CAMPO REVERBERANTE DIFUSO EN UN RECINTO

Cuando una fuente sonora emite dentro de un recinto, existe una primera fase de crecimiento de la energía acústica, posteriormente alcanza un valor constante de establecimiento, y si posteriormente dejara de emitir tardaría un cierto tiempo en extinguirse.

El campo acústico reverberante está formado por todas las ondas acústicas que se han reflejado al menos una vez. Además, este campo acústico reverberante se llama *difuso* cuando la densidad de energía reverberante, en cada instante de tiempo es la misma en cada punto del recinto, este modelo de estudio del campo acústico en un recinto se le conoce como *teoría de Sabine-Franklin-Jaeger de los recintos reverberantes*.

El modelo de Sabine parte de unas hipótesis restrictivas que dan lugar a resultados quizás demasiado simplistas, pero aceptables como una primera aproximación al problema. Básicamente consisten en lo siguiente:

- la densidad de energía sonora es la misma en todos los puntos del recinto, es decir, está distribuida homogéneamente. Esto no es cierto en las cercanías de las paredes del recinto, sobre todo si éstas no son homogéneas.
- la energía contenida en cualquier elemento de volumen se propaga por igual en todas las direcciones, es decir, la energía se propaga de forma isótropa, todas las direcciones de propagación desde un punto son igualmente probables

En este modelo no se considera la distribución de materiales absorbentes ni la forma del recinto, así como la presencia de modos normales de vibración que pueden ser importantes a bajas frecuencias. Además se considera que la potencia reverberante  $W_R$  suministrada por la fuente a la sala, es constante cuando ésta está conectada.

En este modelo, se plantea que cada elemento de las superficies interiores del recinto recibe una cantidad de energía que procede de cada elemento de volumen  $dV$  que componen el recinto y que la energía se propaga por igual en todas las direcciones desde  $dV$ . Basados en estas hipótesis se llega a que en un recinto la intensidad acústica del campo reverberante difuso cumple la expresión:

$$I = \frac{\varepsilon_R c}{4} \frac{W}{m^2}$$

La intensidad del campo reverberante difuso es cuatro veces inferior a la intensidad del campo directo de ondas planas progresivas o en un campo lejano de ondas esféricas con las misma densidad de energía acústica.

Consideremos que en un recinto de volumen  $V$ , una fuente sonora emite a partir de una instante de tiempo  $t = 0$  energía acústica con una potencia constante  $W$ . La intensidad acústica y su evolución hasta alcanzar el estado estacionario dentro del recinto está controlado por la absorción acústica de las paredes y del aire. En general, en recintos pequeños y especialmente a frecuencias bajas, la absorción acústica del aire es muy pequeña. En la hipótesis de que la energía se conserva, se puede establecer que la potencia emitida por la fuente sonora en parte es absorbida por las superficies interiores del recinto y otra parte contribuye al aumento de la densidad de energía de acústica del campo reverberante. No se va a considerar la contribución del campo acústico directo.

La potencia acústica absorbida por las superficies interiores del recinto es:

$$W_a = \frac{\varepsilon c}{4} \cdot A = A \cdot I_R$$

siendo  $A$  la absorción acústica total del recinto en  $m^2$ . La absorción  $A$  de un material cualquiera se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie. Para un recinto  $A$  es la suma de la absorción sonora debida a las superficies límites del local ( $A_1$ ) y la debida a los diferentes objetos y personas en el interior del recinto ( $A_2$ ) así como la absorción debida al aire ( $A_3$ ):

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i + \sum_{j=1}^n \alpha_j n_j + A_3$$

siendo  $\alpha_i$  el coeficiente de absorción sonora y  $s_i$  el área de la superficie de cada tipo de material,  $\alpha_j$  la absorción de un objeto y  $n_j$  el número de objetos de ese tipo que hay en el recinto.

### Crecimiento de la energía acústica:

Por otro lado, el aumento temporal de la densidad de energía reverberante en el recinto viene dado por la expresión:

$$W_R = \frac{d(\varepsilon_R V)}{dt} = V \frac{d\varepsilon_R}{dt}$$

Y la conservación de la energía se escribe:

$$W = V \frac{d\varepsilon_R}{dt} + \frac{Ac\varepsilon_R}{4}$$

es decir, la energía reverberante suministrada por la fuente a la sala se empleará bien en aumentar la densidad de energía en el recinto o bien será posteriormente absorbida por las paredes en alguna de las reflexiones. Es una ecuación diferencial de primer orden con coeficientes constantes cuya solución se escribe de la siguiente manera:

$$\varepsilon_R(t) = \frac{4W}{Ac} (1 - e^{-\frac{Act}{4V}}) = \varepsilon_\infty (1 - e^{-\frac{Act}{4V}})$$

donde  $\tau = \frac{4V}{Ac}$  se define como la constante de tiempo del recinto. A partir de la expresión  $I = \frac{\varepsilon_R c}{4} \frac{W}{m^2}$ ,

la intensidad y la presión acústica el campo reverberante se pueden escribir de la siguiente manera:

$$I_R(t) = \frac{W}{A} (1 - e^{-\frac{Act}{4V}}) = I_\infty (1 - e^{-\frac{Act}{4V}})$$

$$p_R^2(t) = \frac{4W\rho c}{A} (1 - e^{-\frac{Act}{4V}}) = p_\infty^2 (1 - e^{-\frac{Act}{4V}})$$

Y cuando se alcanza el régimen estacionario se cumple:  $I_R = \frac{p_R^2}{\rho c}$ .

### Decrecimiento de la energía acústica:

Si en un instante de tiempo a partir del cual contamos nuestro origen de tiempos, la fuente sonora deja de emitir, el balance energético en el recinto está descrito por la expresión:

$$0 = V \frac{d\varepsilon_R}{dt} + \frac{Ac\varepsilon_R}{4}$$

La solución de esta ecuación diferencial está dada por:

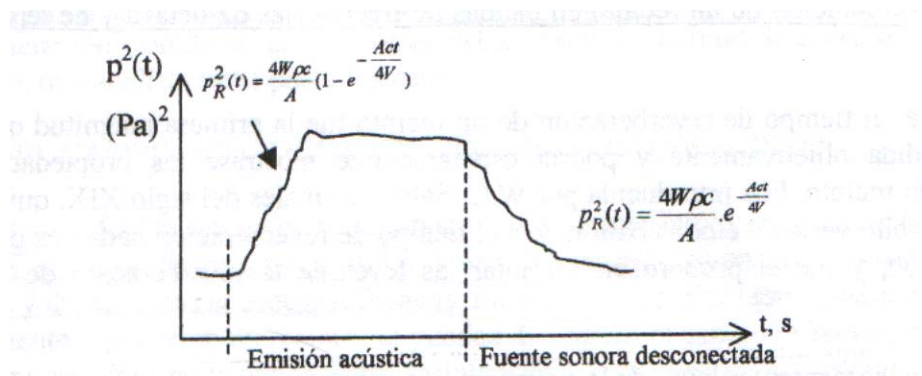
$$\varepsilon_R(t) = \frac{4W}{Ac} e^{-\frac{Act}{4V}} = \varepsilon_0 (1 - e^{-\frac{Act}{4V}})$$

donde  $\varepsilon_0$  representa la densidad de energía estacionaria en el instante en que la fuente sonora deja de emitir. Durante el decrecimiento de la energía acústica reverberante, las expresiones de la intensidad y presión acústica en función del tiempo son:

$$I_R(t) = \frac{W}{A} e^{-\frac{Act}{4V}} = I_0 e^{-\frac{Act}{4V}}$$

$$p_R^2(t) = \frac{4W\rho c}{A} e^{-\frac{Act}{4V}} = p_0^2 (1 - e^{-\frac{Act}{4V}})$$

De las expresiones se deduce que el decrecimiento de la energía acústica reverberante está controlada por la constante de tiempo de la sala, es decir depende del volumen y absorción acústica del recinto.



Las expresiones matemáticas que se obtienen en el crecimiento y decrecimiento de la energía acústica en un recinto son formalmente análogas a otras que se obtienen en otras ramas de la Física. Por ejemplo, en el electromagnetismo al estudiar el proceso de carga y descarga de un condensador en un circuito RC.

A partir de este análisis y como descriptor del decrecimiento exponencial de la energía acústica en un recinto se define lo que se llama el tiempo de reverberación de Sabine o tiempo de reverberación. El físico W. Sabine a finales del siglo XIX lo definió como el intervalo de tiempo que debe transcurrir para que el nivel de presión acústica en el recinto disminuya en 60 dB una vez que la fuente sonora ha dejado de emitir. O bien, el tiempo que transcurre hasta que la densidad de la energía acústica en el recinto decrece a una millonésima parte de su valor inicial.

En un recinto una vez alcanzado el valor estacionario de la presión acústica se desconecta de la fuente sonora y la presión acústica reverberante comienza a disminuir exponencialmente. Al escribir la variación del nivel de presión acústica a partir del nivel de presión acústica estacionaria en función del tiempo se obtiene la ecuación de una recta, cuya expresión es:

$$L_P(t) = L_{P,est} - \frac{1,085cA}{V} t$$

Al calcular el intervalo de tiempo que debe transcurrir para que en el recinto la diferencia del nivel de presión acústica estacionaria y el nivel de presión acústica sea de 60 dB se obtiene la expresión del tiempo de reverberación de Sabine:

$$L_{P,est} - L_P(t) = 60dB \Rightarrow 60dB = \frac{1,085cA}{V} T_{60} = \frac{1,085cA}{V} T_{Sabine}$$

Despejando en la expresión se obtiene:

$$T_{60} = T_{Sabine} = \frac{55,2V}{cA} \approx \frac{0,16V}{A}$$

Esta expresión se ha obtenido en la hipótesis de campo acústico difuso y no se ha tenido en cuenta la absorción acústica del aire en el recinto. Como los coeficientes de absorción dependen de la frecuencia, el tiempo de reverberación dependerá de la frecuencia. En la práctica se calculan los tiempos de reverberación de un recinto en bandas de frecuencias de octava y de tercio de octava. Normalmente el tiempo de reverberación tiende a disminuir a medida que la frecuencia aumenta. Habitualmente cuando se establece un único valor recomendado del tiempo de reverberación para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz.

Históricamente, el tiempo de reverberación de un recinto fue la primera magnitud que pudo ser medida objetivamente y podría esperarse que mostrase las propiedades acústicas de un recinto. Fue introducida por W. C. Sabine a finales del siglo XIX, quien también desarrolló varios métodos para medir el tiempo de reverberación cada vez con mayor precisión, y fue el primero en formular las leyes de la reverberación de un recinto.

Sabine enunció las siguientes leyes de la reverberación en un recinto:

- 1) La duración de la reverberación es independiente de la posición de la fuente sonora y del punto de recepción
- 2) No depende de la situación de las superficies interiores del recinto
- 3) Depende del volumen del recinto, del área de las superficies interiores y de su absorción acústica

W. Sabine fue el fundador de la ciencia de la acústica de recintos. Las técnicas de medida y el conocimiento de la propagación del sonido en los recintos han mejorado desde entonces, pero sus ideas continúan siendo el fundamento de la acústica de recintos moderna. Sabine investigó la absorción acústica de muchos materiales, la primera baldosa acústica fue desarrollada y patentada conjuntamente por W. Sabien y el barcelonés Rafael Gustavino Expósito en 1914. Este producto de se denominó Rumford tile.

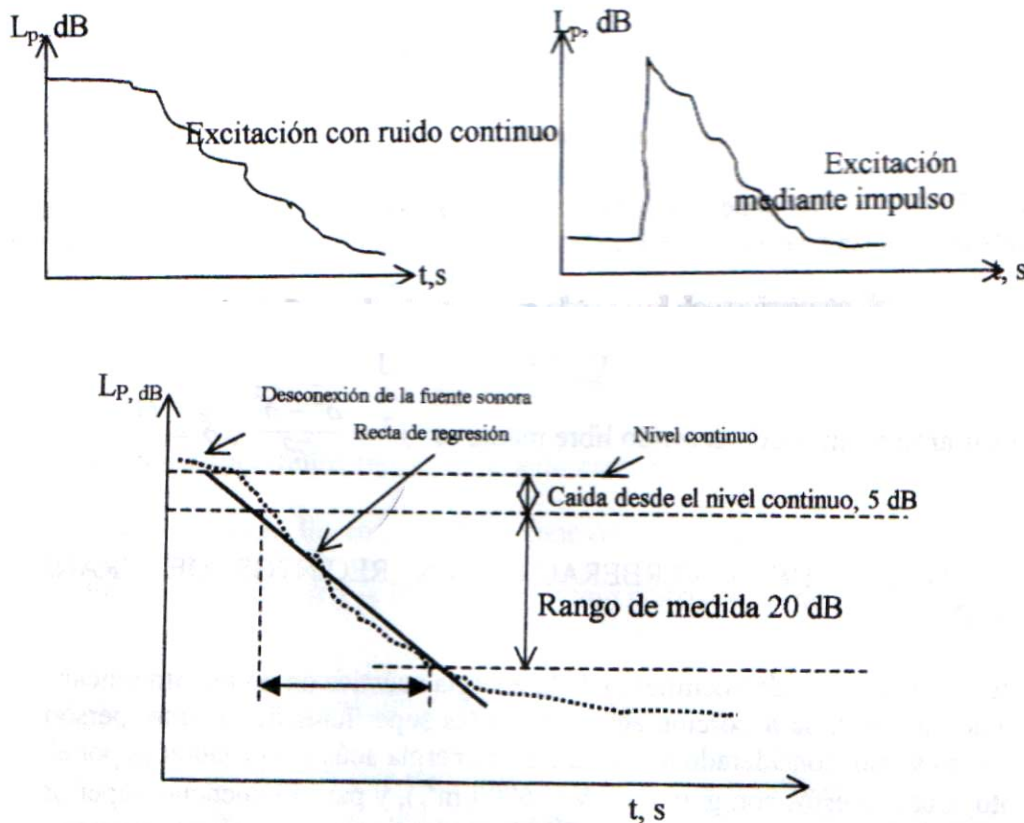
También hay situaciones en las que la expresión de Sabine no predice los resultados adecuadamente, por ejemplo:

- a) Recintos cuyas superficies interiores son totalmente reflectantes (cámaras reverberantes):  $\alpha = 0 \Rightarrow T_{60} \rightarrow \infty$ . En la práctica esto no ocurre, pues siempre hay una pequeña absorción en las superficies interiores y en el aire.
- b) Recintos cuyas superficies interiores son totalmente absorbentes (cámaras anecoicas):  $\alpha = 1$ , toda la energía que llega a los contornos del recinto es completamente absorbida y no tiene sentido hablar del tiempo de reverberación del recinto.

A pesar de que los recintos habituales no son reverberantes difusos. El procedimiento normalizado para calcular el coeficiente de absorción acústica de los materiales utiliza la expresión del tiempo de reverberación de Sabine.

**Medida del tiempo de reverberación en un recinto:**

El tiempo de reverberación es probablemente el parámetro acústico más medido en los recintos. Debido a la presencia en el recinto del ruido de fondo es muy difícil medir una caída completa de 60 dB del nivel de presión acústica, y se suele hacer sobre una caída de 30 dB o de 20 dB, extrapolando la recta de regresión a 60 dB denominándose  $T_{30}$  y  $T_{20}$  respectivamente. Se mide la caída del nivel de presión acústica entre -5 y -35 dB para el primero y entre -5 y -25 dB para el segundo. A veces en el decaimiento de la curva aparecen ciertas irregularidades que son consecuencia de que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso.

**5.4. EL CAMPO ACÚSTICO ESTACIONARIO EN UN RECINTO**

Cuando una fuente sonora emite en un recinto, las superficies interiores proporcionan al oyente un nivel de presión acústica combinación del campo acústico directo de la fuente y de las ondas acústicas reflejadas. En el campo acústico estacionario que rodea a una fuente emisora en un recinto, se pueden distinguir: el campo próximo, en donde no hay una relación matemática entre la intensidad y la presión, a continuación está el campo lejano formado por el campo acústico directo o libre y el campo acústico reverberante.

En cada punto del recinto, el campo acústico es la superposición del campo directo y del campo reverberante, ambos campos acústicos se combinan de forma energética. Y se obtiene entonces, la siguiente expresión:

$$p^2 = p_D^2 + p_R^2$$

siendo  $p$  la presión eficaz resultante,  $p_D$  la presión eficaz directa y  $p_R$  la presión eficaz reverberante. Para una fuente sonora direccional, la presión eficaz directa en el recinto es:

$$p_D^2 = \frac{\rho c W Q}{4\pi r^2}$$

donde  $W$  es la potencia de la fuente y  $Q$  es el factor de directividad de la misma.

La intensidad del campo reverberante en el recinto sigue la expresión:

$$I_R = \frac{p_R^2}{4\rho c}$$

La energía acústica reverberante al incidir sobre las superficies interiores pierde parte de su energía y es absorbida. La potencia acústica absorbida es:

$$W_{abs} = I_R A$$

Cuando la fuente funciona durante un cierto tiempo, se alcanza el nivel estacionario y se establece el equilibrio entre la energía acústica emitida por la fuente y la que es absorbida por las superficies del recinto:

$$W_{ref} = W_{abs} \Rightarrow W(1 - \alpha) = I_R A = \frac{p_R^2 A}{4\rho c}$$

De aquí obtenemos:

$$p_R^2 = \frac{4\rho c W(1 - \alpha)}{A} = \frac{4\rho c W}{\mathfrak{R}}$$

siendo  $\mathfrak{R}$  la denominada **constante de la sala**, y que es igual a la siguiente relación:

$$\mathfrak{R} = \frac{A}{1 - \alpha}$$

La presión acústica resultante es:

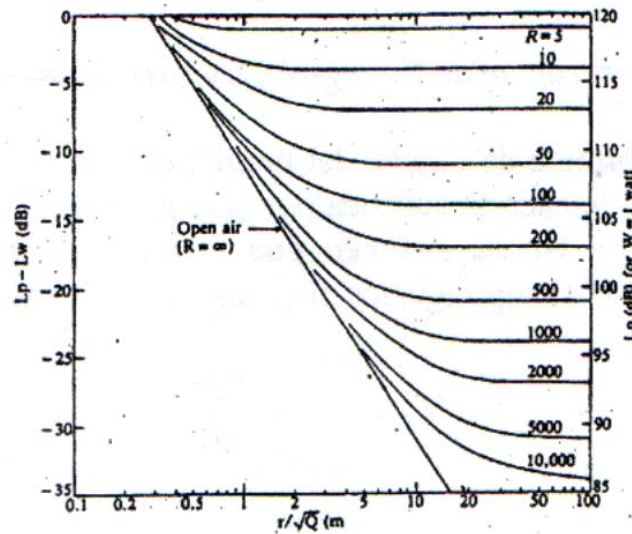
$$p^2 = \frac{\rho c W Q}{4\pi r^2} + \frac{4\rho c W}{\mathfrak{R}} = W\rho c \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{\mathfrak{R}} \right)$$

Existen dos procedimientos primarios para que el campo directo sea mayor, que la fuente acústica sea más direccional y aumentar la absorción acústica en el interior de un recinto.

La anterior expresión se puede escribir en función de los niveles de presión y potencia acústica de la siguiente manera:



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



A la distancia en la que se iguales las contribuciones del campo directo y reverberante, en una determinada dirección, se denomina distancia crítica o radio de reverberación del recinto y que se obtiene de la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{\mathfrak{R}} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{\mathfrak{R}Q}{16\pi}}$$

La ecuación de la presión acústica deducida en este apartado nos permite calcular el nivel de presión acústica en un punto de un recinto cuando el campo acústico es difuso. En muchas situaciones, el campo acústico no es difuso y los valores del nivel de presión acústica en función de la distancia a la fuente no suelen coincidir con las previsiones de la expresión deducida.

En un recinto no se produce una buena difusión en las siguientes situaciones:

- 1) si una de sus dimensiones es cinco veces mayor que otra o las dos dimensiones, como ocurre en pasillos y oficinas muy grandes de techo bajo
- 2) si la forma geométrica del recinto no es sencilla como en una iglesia cruciforme o en un auditorio con grandes palcos suspendidos
- 3) si el sonido tiene uno o más componentes de elevado nivel acústico de frecuencias discretas

## 5.5. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

La medida de los coeficientes de absorción acústica de un material o un dispositivo absorbente sonoro es difícil de determinar en las condiciones reales de montaje, pero es importante conocer los valores orientativos de los mismos, aunque sea en condiciones de laboratorio, pues basándose en estos datos se pueden diseñar el control o la corrección de algunos parámetros acústicos de los recintos.

Existen diversos métodos para determinar los coeficientes de absorción acústica, no existiendo en la actualidad ningún procedimiento que relacione los resultados de medición obtenido por cada uno de ellos. Cada método tiene sus usos particulares. Algunos de los métodos más habituales son: el de la cámara reverberante y el del tubo de impedancia o tubo de Kundt.

**a) El método de la cámara reverberante:**

Mediante el método de la cámara reverberante se mide el coeficiente de absorción acústica de materiales acústicos utilizados como tratamientos en paredes y techos. En la cámara el campo sonoro debe ser lo más difuso posible y el área de absorción acústica equivalente de la cámara vacía deberá ser muy pequeña.

La muestra, si es plana debe tener un área entre 10 y 12 m<sup>2</sup> y montarse de acuerdo con las especificaciones. El coeficiente de absorción sonora  $\alpha_s$  de un absorbente plano debe calcularse mediante la fórmula:

$$\alpha_s = \frac{55,3V}{cS} \left( \frac{1}{T_{60,2}} - \frac{1}{T_{60,1}} \right)$$

Siendo V el volumen de la sala, c es la velocidad del sonido en el aire, S el área de la muestra de ensayo,  $T_{60,1}$  y  $T_{60,2}$  son los tiempos de reverberación de la cámara reverberante vacía y con la muestra de ensayo respectivamente. El método de la cámara reverberante permite calcular los coeficientes de absorción acústica en muestras de tamaño natural en situaciones parecidas a las reales. Sin embargo, utiliza la fórmula del tiempo de reverberación de Sabine, que se obtiene a partir de hipótesis que no siempre se cumplen en el recinto.

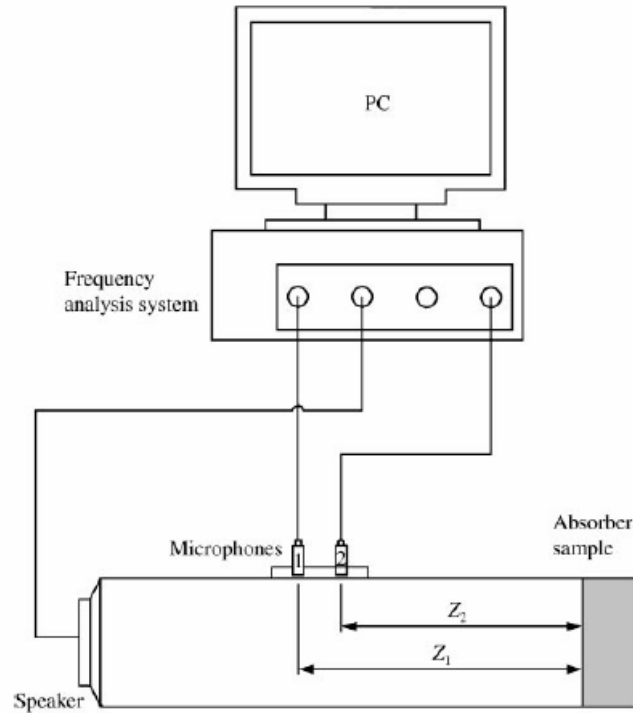
**b) El método del tubo de impedancia:**

El tubo de impedancia o tubo de Kundt se utiliza para la medida de este parámetro en incidencia normal de la onda acústica sobre la muestra. Consiste en un tubo que se cierra en uno de sus extremos por la muestra objeto de estudio. El otro extremo se cierra con un altavoz que genera una señal aleatoria dentro del tubo y que sirve para excitar la muestra. La señal generada incide sobre la muestra, parte será absorbida y parte reflejada. La onda reflejada generada depende de las características de la muestras bajo estudio.

El valor numérico del coeficiente de absorción se determina mediante el “métodos de los dos micrófonos” desarrollado por Blaster y Chung. En este método, se introducen en el tubo de Kundt dos micrófonos que miden la presión sonora en dos puntos diferentes. Las componentes incidente y reflejada sobre la muestra objeto de estudio se deducen de la relación entre las señales acústicas medidas por los micrófonos. Usando estos valores se calcula el coeficiente de reflexión R mediante la siguiente ecuación:

$$R = \left( \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \right) e^{j2k(l+s)}$$

donde  $k$  es el número de ondas,  $l$  es la distancia entre el primer micrófono y la muestra y  $s$  es la distancia o espacio entre micrófonos. El coeficiente de absorción se calcula mediante la ecuación  $\alpha = 1 - |R|^2$ .



Para que la medida del coeficiente de absorción por el método de los dos micrófonos sea correcto la onda generada en el interior del tubo debe ser plana evitando cualquier pérdida a través de las paredes del tubo. Para reducir al máximo estas pérdidas el tubo se fabrica con aluminio anodizado altamente reflectante. De igual manera, las dimensiones del tubo y la distancia entre micrófonos y entre el primer micrófono y la muestra no son arbitrarios sino los adecuados para el funcionamiento óptimo del sistema y conseguir minimizar los posibles errores.

Para medir en todo el rango de frecuencias son necesarias dos configuraciones de medida. En la primera el tubo se cierra con una muestra de 100 mm de diámetro y permite la medida del coeficiente de absorción en un rango de frecuencias comprendido entre 50 y 1660 Hz. En la segunda configuración el tubo se cierra con una muestra de 29 mm de diámetro y permite la medida entre 300 y 6400 Hz.





Las muestras deben prepararse con el diámetro exacto de los dos tipos de tubos para no dejar cámaras de aire que pueden alterar la medida. El montaje de la muestra también puede ser crítico sobre todo cuando se trata de muestras que no son rígidas cuyo espesor y morfología puede ser alterada fácilmente al manipularlas. Por todo ello, es conveniente caracterizar más de una muestra y presentar el coeficiente de absorción como un promedio de todas las medidas realizadas.



## 5.6. TIEMPOS ÓPTIMOS DE REVERBERACIÓN

Desde el punto de vista de un acondicionamiento acústico interesa que el intervalo de tiempo que transcurre entre el sonido directo que llega antes que todas las reflexiones y éstas no exceda de un determinado tiempo, porque en caso contrario aparecería el eco. Todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo. Cuando el sonido emitido es un mensaje oral tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad.

Estos 50 ms corresponden a una diferencia entre el sonido directo y el reflejado de aproximadamente 15 metros por lo que se procurará que los caminos del sonido directo y reflejado no se

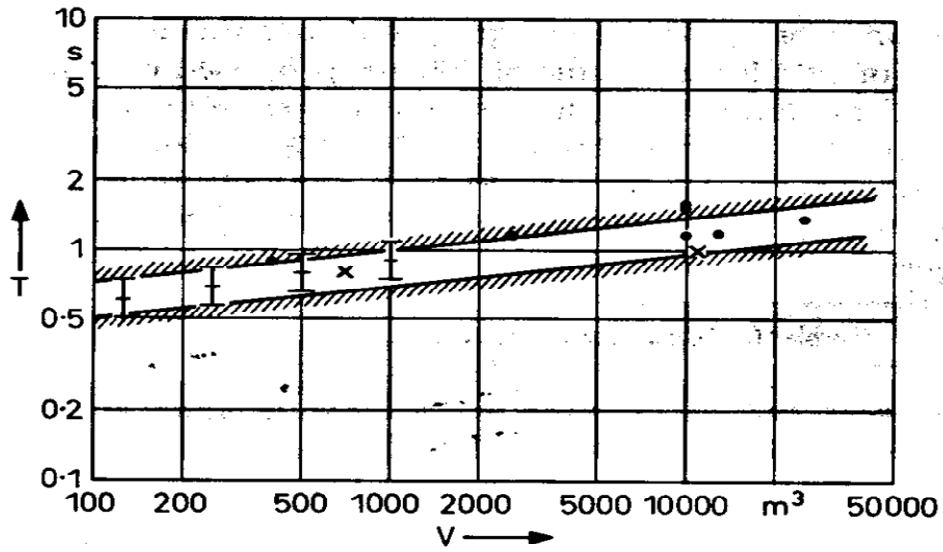
diferencien más de 15 metros. Otra característica a tener en cuenta es conseguir una uniformidad del sonido en el local. Por lo tanto, el campo sonoro reverberante debe difundirse rápidamente para que haya una mezcla adecuada y uniforme del sonido en todo el recinto. La importancia de elegir un tiempo de reverberación adecuado viene dada por el destino del local. A lo largo de los años se han ido elaborando una serie de criterios experimentales para fijar los tiempos óptimos de reverberación de los distintos tipos de recintos teniendo en consideración el uso del mismo, su volumen, naturaleza de las fuentes sonoras actuantes, tipo de representación y frecuencias. En recintos destinados a la palabra (teatros, salas de conferencia...) la inteligibilidad de la palabra obliga a unos tiempos de reverberación menores que en las salas de música. Por otro parte según el tipo de música los tiempos de reverberación son diferentes. Además los gustos personales y las modas pueden afectar a estos valores. A lo largo de los años y según los diferentes autores se han ido proponiendo diferentes tiempos de reverberación para los recintos, de acuerdo con su uso y volumen. En la tabla siguiente se muestran valores promedios del tiempo de reverberación a frecuencias medias propuestos por diferentes autores, según el uso del recinto:

<b>TIPO DE SALA</b>	<b>T(s), sala ocupada</b>
Aulas de enseñanza primaria y secundaria	0.5-0.8
Sala de conferencias (volumen entre 100 y 10.000 m <sup>3</sup> )	0.7-1.2
Cines	0.8-1.2
Salas polivalentes	1.2-1.5
Teatros (volumen entre 100 y 10.000 m <sup>3</sup> )	0.7-1.2
Teatro 1500 plazas	1.2-1.4
Teatro 500 plazas	1.0-1.2
Teatros de opera	1.4-1.8
Salas de concierto: música de cámara	1.3-1.7
Salas de concierto: música barroca y clásica	1.6-1.8
Salas de concierto: música sinfónica	1.7-2.1
Iglesia, catedral: órgano y canto coral	2.0-3.0
Recintos deportivos	1.0-3.0
Locutorio de radio	0.2-0.4

Para obtener unas condiciones óptimas de audición es esencial que el recinto tenga un volumen adecuado de acuerdo a su uso. La absorción acústica en un recinto depende en un porcentaje muy alto del número de personas que ocupan el recinto. El volumen del recinto es función del número de ocupantes. Se considera que el volumen por persona depende del uso del recinto. Por ejemplo, en la bibliografía especializada se encuentran se consideran los siguientes volúmenes:

<b>Volumen por asiento, m<sup>3</sup>/persona</b>		
<b>Tipo de recinto</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Salas de conciertos</b>	6,5	10
<b>Salas de opera</b>	5,0	8
<b>Salas multifuncionales</b>	5,5	8,5
<b>Teatros</b>	4,0	6,0
<b>Iglesias</b>	5,7	11,9
<b>Cines</b>	4,5	6,0
<b>Aulas</b>	3	5

Intervalos de tiempo de reverberación recomendados a frecuencias medias para locales dedicados a la palabra



Tiempos óptimos de reverberación a frecuencias medias, para la palabra y la música en función del volumen. Para locales terminados, pero sin mobiliario y ocupantes:

