340 - 3

los ruidos en las edificaciones I

J. M. TOBÍO, Dr. en Química Industrial

Con ocasión de haber puesto a punto una buena parte del equipo para ensayos acústicos del Laboratorio de Ensayos Físicos, del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, iniciamos una serie de artículos de divulgación sobre las técnicas usuales en este campo.

En este primer trabajo se indican algunas nociones fundamentales que conviene «refrescar» para la mejor comprensión del tema.

1.-Principios generales y terminología

Tanto desde el punto de vista fisiológico como del psicológico, los ruidos, en sus diversas formas, constituyen una amenaza para nuestro bienestar. Pueden perjudicar nuestra perfecta audición, dañando el delicado mecanismo del oído, perturbar nuestro sueño, ocasionar fatiga, nerviosismo, irritabilidad y, en una palabra, atentar contra el rendimiento en el trabajo o contra las horas de descanso.

Arquitectos e ingenieros deben preocuparse de dar a sus construcciones un diseño tal, que los problemas del ruido no existan o resulten aminorados hasta el máximo, cuestión que, en general, es siempre posible.

Para comprender bien dichos problemas, resulta conveniente familiarizarse con las definiciones y terminología de la acústica, con sus métodos de trabajo y con los principios en que se basan los ensayos tanto de laboratorio como en obra.

El *sonido* puede definirse como una alteración física o mecánica capaz de ser detectada por el oído humano. Una fuente típica de sonidos es el diapason (figura 1).

1

Su movimiento de vaivén (vibración) se comunica a las partículas de aire que lo rodean, originándose fluctuaciones en la presión gaseosa por encima y por debajo de la presión estática (P_0 , presión atmosférica), que dan lugar a *compresiones* y *depresiones* (o enrarecimientos) del aire, que se transmiten como una *onda sonora* hasta nuestro oído. Como es lógico, estas variaciones de presión originan modificaciones en la densidad del aire (d).

Al número de vibraciones por segundo del diapason se le denomina *frecuencia* (f), que se mide en ciclos/segundo. La distancia entre dos máximos (o mínimos) de presión consecutivos (fig. 1) se llama *longitud de onda* (λ), y viene dada en metros o en centímetros; el tiempo transcurrido entre dichos dos máximos es el *periodo* (T), en segundos.

Resulta evidente que las tres magnitudes f , λ y T , vendrán relacionadas por las fórmulas:

$$f = \frac{1}{T} \quad [1] \quad ; \quad \lambda = \frac{V}{f}, \quad [2]$$

siendo V la *velocidad de propagación* del sonido que, para el aire en condiciones normales, es igual a 331×10^2 centímetros/segundo.

El sonido producido por un diapason tal como el de la figura 1 es un sonido puro, caracterizado por su frecuencia y por su *intensidad*. Esta última magnitud es la mayor o menor fuerza con que la onda sonora hiere nuestro oído y será proporcional, como es lógico, a la amplitud de la vibración de las ramas del diapason o, dicho de otro modo, a la elongación máxima del objeto que vibra. Todos los dispositivos de medida de esta intensidad se basan en determinar las variaciones de la presión del aire, *presión sonora* (P), producidas por las compresiones y depresiones de la fig. 1. La presión sonora se mide en dinas/cm² o microbarías.

2.-Energía sonora, niveles acústicos y ruidos

En general, resulta más conveniente medir la intensidad sonora como la energía mecánica originada por la presión gaseosa (sonora) en un elemento de superficie. Esta magnitud se denomina *flujo de energía sonora*, y viene dada en vatios/cm². La fórmula de paso de presión a energía es:

$$\Phi = \frac{P^2}{10^7 \cdot d \cdot V} \text{ W/cm}^2, \quad [3]$$

en la que P viene dado en dinas/cm²; d es la densidad del aire en g/cm³; y V, la velocidad del sonido en el aire en cm/seg. La fórmula [3] es válida para ondas planas o esféricas libres.

Las diferencias, tanto de presión como de flujo de energía, para los diversos sonidos prácticos, son del orden de miles de millones de veces y, por ello, se utilizan para la medida magnitudes logarítmicas.

Así, el *nivel de intensidad sonora* se define como diez veces el logaritmo decimal de la relación entre dos flujos de energía, uno de ellos tomado como patrón, es decir:

$$N = 10 \log \frac{\Phi}{\Phi_0} \text{ decibelios}, \quad [4]$$

mediéndose en belios (bel) o decibelios (db). El nivel standard o patrón para Φ_0 es de 10^{-16} vatios/centímetro cuadrado.

El *nivel de presión sonora* también podrá expresarse en decibelios, mediante la fórmula [3]:

$$\Phi = \frac{P^2}{10^7 \cdot d \cdot V}; \quad \Phi_0 = \frac{P_0^2}{10^7 \cdot d \cdot V}$$

y dividiendo:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{P^2}{P_0^2}$$

Tomando logaritmos y multiplicando por 10:

$$N = 10 \log \frac{\Phi}{\Phi_0} = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ decibelios}, \quad [5]$$

adoptándose como presión standard (P_0) la de 2×10^{-4} dinas/centímetro cuadrado.

En general, los aparatos que miden intensidades sonoras responden a las presiones acústicas y no a las energías.

Desde el punto de vista de la percepción de sonidos, la unidad más empleada es el *fon* o *fonio*. Por definición, el nivel sonoro en fonios de un sonido de frecuencia X es numéricamente igual al nivel de presión sonora, en decibelios, de un sonido de 1.000 ciclos/seg que produce la misma sensación acústica (a juicio del oyente) que dicho sonido de X ciclos/segundo.

Ya hemos dicho que un sonido tal como el producido por el diapasón, es un sonido puro. En la práctica, los sonidos no son puros, sino que poseen distintas frecuencias. Un *sonido musical* posee una frecuencia fundamental y varios armónicos, cuyas presiones sonoras son menores que la fundamental (fig. 2-B). Finalmente, se hallan en la práctica sonidos mucho más complejos, tal como el C, figura 2, que poseen frecuencias cualesquiera y amplitudes que varían con la frecuencia y con el tiempo. Este tipo de sonidos se conoce como *ruido*.

3.-Medida de ruidos

De lo anteriormente expuesto se deduce que todas las medidas acústicas se reducen, en la práctica, a dos: intensidad y frecuencia. Para la medida de intensidad, amplitud o presión sonora, se emplean los llamados *medidores de nivel sonoro*, cuyo esquema constructivo resulta evidente del dibujo de la figura 3. Un micrófono convierte las variaciones de presión sonora en variaciones eléctricas, que luego son amplificadas y visualizadas en un simple mili o microamperímetro. Estos aparatos, uno de los cuales puede verse en la figura 4, vienen, generalmente, calibrados directamente en decibelios.

Como es natural, el análisis de un ruido no será completo a menos que se conozca su «espectro de frecuencias», es decir, las frecuencias (en ciclos/seg) de sus principales componentes. Para esta medida se requiere un *analizador de frecuencias*, tal como el diagramado en la fig. 5.

Constan estos aparatos de un micrófono, un preamplificador, un amplificador selectivo, un amplificador de salida y un aparato de medición.

Las señales acústicas son transformadas en eléctricas por medio del micrófono. Luego son amplificadas y enviadas al amplificador selectivo, que sólo amplifica la frecuencia deseada. El aspecto externo de uno de estos aparatos puede verse en la figura 6.

A estos dos aparatos fundamentales, el medidor de nivel sonoro y el analizador de frecuencias, hay que agregar una serie de dispositivos accesorios, tales como registros gráficos, calibradores para micrófono, amplificadores, generadores de baja frecuencia para obtener sonidos puros, osciladores modulados en frecuencia (o aulladores) que producen un espectro de frecuencias, altavoces, generadores de ruidos de impacto, resonadores y otros instrumentos, de los cuales tendremos ocasión de hablar en otros artículos de esta serie.

4.-Absorción del sonido y reverberación

Cuando las ondas sonoras inciden sobre una superficie se comportan como una energía vibratoria cualquiera. Parte de la misma se refleja y otra parte resulta absorbida por el material convirtiéndose, en general, en calor.

Se denomina *coeficiente de absorción*, α , al cociente:

$$\alpha = \frac{\Phi_i - \Phi_r}{\Phi_i} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_i = \text{energía incidente} \\ \Phi_r = \text{energía reflejada} \end{array} \right. \quad [6]$$

y puede hallarse tanto en función de las energías, en vatios, como de las presiones P , mediante las fórmulas [3] y [6].

El coeficiente α , que suele variar mucho con la frecuencia, adopta valores muy pequeños para las superficies no porosas y pulidas y valores que tienden a la unidad para materiales muy porosos, tales como el fieltro o el Celotex.

Otro coeficiente que suele emplearse en los estudios acústicos es el *coeficiente de reducción de ruidos*, NRC, que no es más que la media de los valores de α para las frecuencias de 250, 500, 1.000 y 2.000 ciclos/segundo.

Mucho mejor que con los coeficientes anteriores, un material absorbente del sonido queda definido con el término *impedancia acústica*, Z_a , que se mide en ohmios acústicos, y que no es más que la relación compleja entre la presión sonora, P , y la velocidad de partícula, de aire, en la superficie del material.

Los anglosajones emplean como unidad de absorción equivalente el *sabín*, que es igual a la absorción equivalente de un pie cuadrado de una superficie de un material tal, que $\alpha = 1$; es decir, la absorción provocada por un pie cuadrado de superficie que absorba toda la energía sonora incidente (un pie cuadrado de ventana abierta «podría» hacerlo así).

Cuando existe, en un recinto cerrado, una fuente puntual de sonido que irradia en todas direcciones, las ondas sonoras

pueden llegar al oído por *rayo directo* o por *rayo reflejado* (figura 7). Estas últimas ondas constituyen el sonido reverberante o *reverberación*.

Al hecho de que existan estas reflexiones o ecos, se debe el que el sonido existente en el recinto no caiga inmediatamente a cero cuando cesa de actuar la fuente sonora. El tiempo, en segundos, requerido para que el nivel sonoro (presión sonora) caiga a un milésimo de su valor inicial se llama *tiempo de reverberación* (t_{60}) y equivale al tiempo transcurrido para una pérdida de nivel de presión sonora de 60 decibelios.

El tiempo de reverberación, para un recinto de v m³ viene dado por la fórmula de Sabine:

$$t_{60} = \frac{0,161 \cdot v}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \text{ segundos,} \quad [7]$$

en la que $\sum \alpha_i \cdot S_i$ es la suma de los productos de los m² de las distintas superficies interiores del recinto por sus coeficientes de absorción respectivos.

El tiempo de reverberación es uno de los índices más importantes para juzgar de la bondad acústica de un local. Los valores óptimos de t_{60} dependen no sólo del volumen del recinto [7], sino del destino que vaya a darse a la sala en cuestión, tal como se expresa en las gráficas de la figura 8, correspondientes a diversos tipos de aplicaciones.

Vemos, por ejemplo, que un t_{60} de 3 segundos puede resultar conveniente en una iglesia de grandes proporciones, mientras que es totalmente inadmisibles en un cine o en una sala de conferencias.

Para las determinaciones de tiempos de reverberación se hace uso de las mismas técnicas mencionadas en 3. Existen equipos manuales y automáticos para realizar esta operación que, en definitiva, consiste en producir un sonido de intensidad constante dentro del recinto, medir el nivel sonoro, parar bruscamente la fuente de sonido y medir el tiempo que transcurre hasta que el nivel sonoro baja a un milésimo de su valor original.

La figura 9 corresponde a un equipo de esta clase: M es el micrófono captador; A, el preamplificador; R, el registro gráfico de nivel sonoro; OBF, el oscilador de baja frecuencia; y P, el altavoz. En la parte superior de la figura puede apreciarse una curva de reverberación de la que se deduce fácilmente el valor t_{60} . Más adelante volveremos sobre estas cuestiones con más detalle.

5.-Aislamiento acústico

Cuando se trata de impedir que uno sonido pase de un espacio a otro es menester colocar entre ambas una «barrera» sólida, es decir, un aislante. Los muros o paredes gruesos y masivos constituyen buenos aislantes para el sonido.

No hay que confundir—como a veces ocurre— el aislamiento sónico con la absorción. Los materiales porosos, ligeros, que constituyen buenos aislantes térmicos y excelentes absorbentes del sonido son, en general, malos aisladores acústicos. Prácticamente, son «transparentes» para el sonido.

La eficacia de una barrera aislante viene definida por el *coeficiente de transmisión*, τ , dado por:

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_i} \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{\tau} = \text{energía sonora que atraviesa el material} \\ \Phi_i = \text{energía incidente} \end{array} \right. \quad [8]$$

Fotos: M. G.ª

Aunque, más frecuentemente se usa el término *pérdidas de transmisión*, TL, dado por:

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \text{ db} , \quad [9]$$

que viene dado en decibelios. Este parámetro es, en realidad, una medida del factor de aislamiento acústico.

— SONIDO DIRECTO
- - - " REVERBERANTE

De una forma parecida a como se expresó en 4, también se usa en acústica el término *pérdidas de transmisión medias*, TL, definido como «la media aritmética de los valores de TL para las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000 y 2.000 c/s».

Las TL aumentan, para un material dado, con la frecuencia a un ritmo aproximado de 3 a 6 db al doblar la frecuencia. Igualmente aumentan con la densidad del material, de tal modo que, cuando se dobla el peso en kg/m^2 (a espesor constante) de un material, las TL incrementan en 4 a 5 db. Puesto que ambas variaciones poseen el mismo sentido, se han reunido en una especie de *ley de masas* de reducción de intensidad sonora para materiales sólidos. Llevando a una gráfica los valores de TL en decibelios (ordenadas) y los productos frecuencia $\times$ peso por unidad de superficie (kg/m^2) (abscisas), se obtiene prácticamente una recta, cuando el sonido incidente sobre el material está más o menos uniformemente distribuido en todas las direcciones posibles. Esta recta es, teóricamente, valedera para todos los materiales.

Veamos esto más claramente con un ejemplo: Si en la gráfica de la figura 10 vemos que a un valor de «ley de masas» de 50.000 corresponden unas TL de 41 db, estas TL pueden lograrse con un material de 50 kilogramos/metro cuadrado para 1.000 c/s o con uno de 100 kg/m^2 , para 500 c/s.

10

O dicho de otro modo, es más difícil aislarse de los sonidos graves que de los agudos. Y también: para un material dado, el muro aislante debe ser tanto *más grueso* (o denso) cuanto *más baja* es la frecuencia del sonido incidente. Una vez más comprobamos el enorme efecto de la frecuencia en cuanto al comportamiento de los materiales.

Para los cálculos de TL la magnitud que se tiene en cuenta, para los diversos materiales, es, como hemos visto, la «densidad superficial», o sea, el peso en kg/m^2 . El espesor, para gruesos normales, no tiene importancia excepto, claro está, en cuanto a su efecto sobre el mencionado valor de kilogramos/metro cuadrado.

Así, pues, cuando se indiquen las propiedades aislantes de un material es preciso señalar que las TL de «tantos db» tienen lugar a «tal frecuencia».

Para un muro de ladrillo ordinario de 10 cm de espesor, las $\overline{TL}$ son de unos 46 db. Pero esto no indica, en modo alguno, cómo se comportará este ladrillo frente a una frecuencia dada.