CONDICIONES ACUSTICAS EN LOS EDIFICIOS

Por:
Antonio MARTIN del Río
y
Santiago VIGNOTE Peña

El 7 de septiembre de 1981 se publicó en el Boletín Oficial del Estado el Real Decreto 1909/1981 por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación sobre condiciones acústicas en los edificios.

La necesidad de proteger a los ocupantes de los edificios de las molestias físicas y psíquicas que ocasionan los ruidos ha movido a la Administración a dictar una serie de medidas de obligado cumplimiento, tanto para las edificaciones públicas como privadas, e incluso para los medios productores de ruido.

No se van a reproducir dichas medidas, porque vienen publicadas íntegramente en el Boletín Oficial del Estado ya señalado, simplemente se va a tratar de explicar los fenómenos acústicos.

GENERALIDADES

El sonido es la propagación de una vibración a través de un medio, siendo la causa de ésta una perturbación mecánica (golpe de un martillo sobre un yunque, vibración del cono de un altavoz o de una cuerda de guitarra, etc.). Es importante resaltar, que lo que se transmite es la vibración de las partículas del medio y no éstas, que vibran siempre en torno a posiciones de equilibrio fijas. Es decir, se transmite la energía pero no la materia.

El último vehículo de transmisión del sonido es siempre el aire, ya que es el medio que está en contacto con el tímpano. En éste, la vibración se manifiesta mediante compresiones y depresiones que avanzan en dirección radial con centro, el foco emisor a una velocidad promedio de 340 m/seg. (para una temperatura de 20 °C y 1 atmósfera de presión).

A continuación se expresan unos conceptos fundamentales.

— Frecuencia es el número de ciclos de compresión-dilatación que afectan a un punto en la unidad de tiempo. La unidad de frecuencia es el Hertzio (Hz)

$$1\ \text{Hz} = \frac{1\ \text{ciclo}}{1\ \text{s}}$$

El intervalo de frecuencias dentro del cual el hombre percibe sensación acústica es 20 Hz a 20.000 Hz.

— Ley de Weber-Fechner que relaciona el estímulo con la sensación producida: La variación de la sensación es proporcional a la variación relativa del estímulo (es decir, a la variación por unidad de estímulo).

En acústica la magnitud «sensación» se llama sonoridad o nivel sonoro (S), en tanto que la magnitud «estímulo» se denomina intensidad del sonido (I).

Intensidad de sonido es la cantidad de energía que por unidad de tiempo atraviesa la unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación.

Sonoridad es el nivel de sensación producido en el oído humano. Es importante reseñar que para la misma intensidad de sonido la sonoridad depende de la frecuencia.

La ley de Weber-Fechner, para una frecuencia determinada, se expresa algebraicamente de la siguiente forma:

$$dS = K\,\frac{dI}{I}$$

siendo K una constante de proporcionalidad cuyo valor depende de las unidades elegidas.

Integrando entre dos valores resultaría:

$$S_2 - S_1 = K \lfloor \frac{I_2}{I_1} = K \lfloor 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

haciendo

$$K \lfloor 10 = K' (\text{cte}) \qquad S_2 - S_1 = K' \log \frac{I_2}{I_1}$$

Se llama intensidad umbral (Io) al valor mínimo de ésta que produce sensación acústica (So), es decir que para

$$I = Io$$
$$S = So = O$$

Introduciendo estos valores en la expresión anterior, se obtiene:

$$(1) \qquad S = K' \log \frac{I}{Io}$$

Anteriormente se ha indicado que la sonoridad también depende de la frecuencia. En términos generales, se puede afirmar que a igualdad de estímulo el oído humano percibe más sensaciones cuanto más agudo sea el sonido (mayor frecuencia). La causa de este fenómeno no es otro que la propia anatomía del oído, ya que existe más densidad superficial

de terminaciones nerviosas en las zonas del oído interno, destinadas a recoger las altas frecuencias.

Unidades:

Intensidad sonora: $\frac{W}{cm^2}$

Sonoridad: Como consecuencia de la dependencia de la sensación sonora con la frecuencia se han establecido distintas unidades de sonoridad, cuya utilidad se verá a continuación.

Bel: Es una unidad puramente física independiente de la diferente sensibilidad que tiene el oído humano a los sonidos de distintas frecuencia.

Si en la expresión (1) se hace K'=1,

siendo

I= intensidad de un sonido de frecuencia determinada cuya sensación (S) producida queremos medir

Io= intensidad umbral de dicho sonido, se obtiene

$$S=\log\frac{I}{Io}$$

donde S queda expresado en Beles (B).

Dando los valores a la sensación sonora se obtiene:

S(B)	1	2	3	n
I (W/cm²)	10 I_o	100 I_o	1000 I_o	10^n I_o

Como se observa en la tabla, para aumentar una unidad de sensación acústica es preciso aumentar por diez la intensidad.

Decibel A(dB A).—La unidad Bel era por una parte una unidad demasiado grande para la percepción humana que acusa diferencias de sonoridad más sutiles y, por otra parte, la necesidad de adaptarse a la sensibilidad humana hizo que surgiese el decibel A, cuyas características son:

— Es una magnitud alrededor de 10 veces más pequeña que el Bel
— Es una magnitud ponderada por el hecho de que el oído humano no responde igual ante sonidos de igual intensidad, pero de distinta frecuencia.

Si en (1) se hace K'=10; I_o la intensidad del sonido a la frecuencia de 1.000 Kz, en lugar de la de aquella cuya sensación queremos evaluar y I' la intensidad tal que produciendo la misma sensación que la del sonido que queremos evaluar proceda de un sonido de 1.000 Hz.

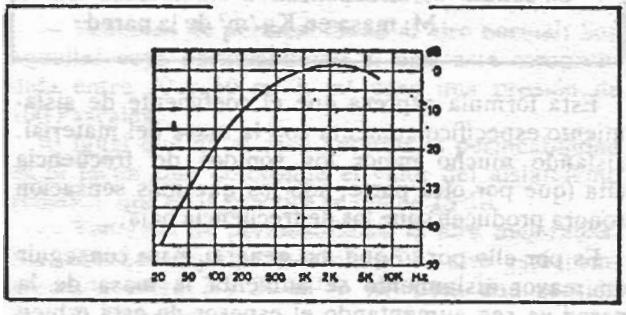
$$S=10\log\frac{I'}{I'_o}$$

Dando valores a la sensación sonora (S) se obtiene:

S (d B A)	10	20	30	10^n
I'(W/cm²)	10 I'_o	100 I'_o	1000 I'_o	10^n I'_o

Experimentalmente se han construído unas curvas de igual sonoridad representadas en el punto 1.21 de la Norma y éstas han servido de base para la curva de ponderación de la figura siguiente.

Esta curva sirve para compensar las diferencias



Así, para una frecuencia de 100 Hz se obtienen los decibelios A(D B A) restando 19,1 a los decibelios (d B) a su vez obtenidos mediante aparatos de medida físicos.

Para la frecuencia de	125 Hz	habría que restar	16,1	a dB	para obtener	dBA
» »	160	»	» 13,4	»	»	
» »	200	»	» 10,9	»	»	
» »	500	»	» 3,2	»	»	
» »	1.000	»	» 0	»	»	

Es decir, que a 1.000 Hz coinciden los decibelios con los decibelios A

Para la frecuencia de 2.000 Hz habría que sumar 1,2 a dB para obtener dBA
Para la frecuencia de 5.000 Hz habría que sumar 0,5 a dB para obtener dBA

de sensibilidad que tiene el oído humano para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo (20 Hz y 20.000 hz).

AISLAMIENTO ACUSTICO

El sonido transmitido por el aire que choca sobre una pared, parte se refleja, parte es absorbido por el propio material (que transforma la energía vibratoria del sonido en calor) y parte se invierte en hacer vibrar la pared, convirtiéndose en un nuevo foco de sonido que transmite al espacio aéreo contiguo.

1.—Aislamiento de los sonidos propagados por el aire que inciden sobre una pared, procedentes del exterior del local

El índice de aislamiento R de una pared es la relación logarítmica entre la intensidad acústica incidente y la intensidad acústica transmitida por la pared.

Para el caso de una pared simple, el índice de aislamiento del material depende del valor del aislamiento específico «a» del elemento constructivo que forma la pared, de la frecuencia de características f_c del material de su absorción acústica A y de su permeabilidad.

— El aislamiento específico «a» que se expresa en decibeles A tiene por valor el siguiente:

$$A = 10 \log (f \cdot M)^2$$

en donde: f: frecuencia
M: masa en Kg/m^2 de la pared

Esta fórmula expresa que el coeficiente de aislamiento específico aumenta con la masa del material, aislando mucho mejor los sonidos de frecuencia alta (que por otra parte, son los que más sensación sonora producen) que los de frecuencia baja.

Es por ello por lo que, en general, para conseguir un mayor aislamiento se aumenta la masa de la pared ya sea aumentando el espesor de ésta o bien construyéndola con materiales de elevada densidad.

— El sonido que atraviesa la pared, parte se convierte en calor (absorción acústica de la pared A) y parte se invierte en hacer vibrar en flexión a la pared, transmitiendo el sonido.

La energía sonora que se invierte en calor, es debida al rozamiento que produce las vibraciones contra el material. Al ser debido al rozamiento, la absorción será mayor cuanta mayor superficie disponga el material, esto es cuanto más poroso sea éste.

Normalmente, la energía vibratoria que se transforma en calor, suele ser alrededor de 100 a 1.000 veces más pequeño que el valor de «a», por lo que en la práctica se suele despreciar.

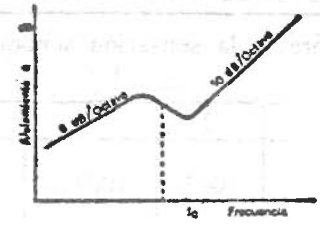
FRECUENCIA DE COINCIDENCIA

La energía que se invierte en hacer vibrar a la pared, provoca nuevas ondas sonoras, cuyo valor depende de la intensidad y frecuencia del sonido y de la frecuencia característica del material

$$f_c = \frac{6{,}4 \cdot 10^n}{d} \sqrt{\frac{P(1-\sigma)^2}{E}}$$

siendo:
d=espesor de la pared
P=densidad del material en kg/m^3
σ=coeficiente elástico de Poisson del material
E=módulo de elasticidad de Young del material

Si la frecuencia del sonido coincide con la frecuencia característica del material (efecto de coincidencia) se produce un fenómeno de resonancia que se materializa en un aumento de la transmisión del sonido (véase la curva de la figura siguiente).



Esquema simplificado del efecto de coincidencia

Debido a esto se debe escorger materiales cuya frecuencia de resonancia esté por debajo del dominio de las frecuencias que se deseen aislar. Para conseguir esto, se debe buscar sobre todo aumentar el espesor de la pared, disponer de materiales de gran coeficiente de elasticidad y poca masa y en su conjunto gran rigidez.

PERMEABILIDAD

Por último y como puede resultar evidente, la permeabilidad indica una facilidad o dificultad para la transmisión del sonido. Una ventana abierta, donde la permeabilidad al aire es total, transmitirá los sonidos de una parte de la ventana a la otra sin pérdida de su sonoridad, esto es, su aislamiento es nulo. Por tanto a mayor permeabilidad, mayor facilidad tendrá el sonido para traspasar la pared o elemento de pared.

Este factor es el más importante en ciertos elementos de pared, como es el caso de las ventanas o puertas, donde los valores de permeabilidad son bastante elevados.

Resumiendo, para aislar una pared de los sonidos propagados por el aire, procedentes del exterior, debe buscarse las siguientes características:

— Estanqueidad al aire
— Elevada masa
— Frecuencia de resonancia de la pared muy pequeña

Para conseguir elevada masa y pequeña frecuencia de resonancia se suele recurrir a mezclar varios materiales constructivos, el primero de gran densidad y el segundo ligero, de gran elasticidad, rígidamente unido al primero (estructura masa-resorte).

CASO DE PAREDES DOBLES O MULTIPLES

Estas paredes están formadas por varios tabiques que encierran entre sí espacios huecos, llenos de aire.

Los fenómenos acústicos en este caso se rigen por los mismos factores señalados en el punto anterior, pero además la capa de aire juega un papel amortiguador, proporcional al espesor de la capa de aire, ya que la frecuencia crítica del elemento es:

$$f_c = 60 \sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)}$$

siendo:

m_1 y m_2 = la masa en Kg/m² de la pared
d = la distancia entre paredes sencillas

Al igual que en el caso anterior cuando coincide la frecuencia del sonido con la característica del material, se produce el fenómeno de resonancia, en el cual se hace máxima la transmisión del sonido (véase la curva de la figura anterior en pág. 12).

Por esta causa se debe escoger uan distancia entre las paredes sencillas que garanticen que la frecuencia de coincidencia esté por debajo del dominio de las frecuencias que se desee aislar.

Un ensayo efectuado por E. Mayer sobre paredes formadas por tabiques múltiples de tablero contrachapado, compuestos de 1, 2, 3, 4 y 5 tabiques sencillos, con las características que se expresan dieron como resultado los coeficientes de amortiguación de sonido que expresamos en el cuadro de la página siguiente.

Como puede apreciarse, el aislamiento obtenido al interponer espacios de aire es muy notable, siendo la explicación de esto el hecho de que es el aire un elemento muy ligero y de gran elasticidad, con el que se conseguirá la estructura ya denominada masa-resorte.

El problema real que se plantea a estas paredes es la unión rígida de todo el conjunto, ya que para ello sería necesario interponer otro elemento intermedio que realice la unión. Estos elementos intermedios actúan de puentes acústicos que debilitan el valor del aislamiento obtenido teóricamente.

Es por tanto, por lo que cuanto menor sea el número de ligazones, mejor será el aislamiento obtenido, siendo siempre mejor la ligazón por puntos que por líneas.

APLICACION DE CONCEPTOS A VENTANAS Y PUERTAS

1.1.—Ventanas

El aislamiento acústico de las ventanas viene determinado como ya se anticipó anteriormente, por la permeabilidad al aire y también por las características del acristalamiento, ya que es este material el que predomina en el total de la ventana.

1.1.1.—Ventanas simples

— **Ventanas de permeabilidad al aire sin clasificar:** Son aquellas cuya permeabilidad al aire es superior a 50 m³/h m² para una presión de 100 Pascales.

En este caso la permeabilidad es el factor más preponderante, por lo que en la práctica, independientemente del tipo de acristalamiento, se fija como valor del aislamiento acústico el de 12 dB.

— **Ventanas de permeabilidad al aire normal:** Son aquellas cuya permeabilidad al aire está comprendida entre 20 y 50 m³/h m² para una presión de 100 Pascales.

Al igual que en el caso anterior la permeabilidad es el factor que determina el valor del aislamiento acústico, que en la práctica se fija de 15 dB.

— **Ventanas de permeabilidad al aire mejoradas:** Son aquellas cuya permeabilidad al aire está comprendida entre 7 y 20 m³/h m² para una presión de 100 Pascales.

En este caso el tipo de acristalamiento influye también de forma notable en el valor del coeficiente de amortiguación. Por ello en la práctica el valor del coeficiente se calcula teniendo en cuenta el espesor del acristalamiento, el número de láminas de vidrio y la distancia entre láminas.

— **Ventanas de permeabilidad al aire reforzadas:** Son aquellas cuya permeabilidad al aire es menor a 7 m³/h m² para una presión de 100 Pascales.

Al igual que en el caso precedente, el acristalamiento influye de forma notable en el valor del coeficiente de amortiguación, por lo que en la práctica se calcula teniendo en cuenta el espesor del

Ensayo efectuado por E. Mayer sobre paredes formadas por tabiques múltiples

Peso por pared: 2 Kg/m²
Distancia entre cada tabique sencillo: 30 cm
Frecuencia crítica del material: 480 Hz

Frecuencia en Hz	100	200	400	600	800	1.000	2.000	3.000
Coef. de amortiguación para tabiques								
1	14	13	15	19	21	23	28	31
2	15	16	13	18	20	23	35	39
3	16	16	16	19	22	36	37	40
4	10	15	16	23	24	27	43	46
5	17	17	17	24	26	31	45	50

N.º Puerta	Descripción de la Hoja					Cerco	Juntas	Espesor mm	Masa kg/m²	Aislamiento acústico
1	Chapa Metálica 1 mm	Amianto 2 mm	Fibra Mineral 31 mm	Amianto 2 mm	Chapa Metálica 1 mm	Metálico	estancas	37	18	35 dBA
2	Estratificado 1 mm	Tablero Aglomerado 3,7 mm	Tablero Aglomerado 30 mm	Tablero Aglomerado 3,7 mm	Estratificado 1 mm	Madera	estancas	39	20	29 dBA
3	Chapa metálica 8 mm					Metálico	estancas	8	65	29 dBA
4	Tablero Aglomerado 3,3 mm	Tablero Aglomerado 33,4 mm	Tablero Aglomerado 3,3 mm			Madera	estancas	40	30	28 dBA
5	Chapa metálica 0,6 mm	Expandido 43 mm	Chapa Metálica 0,6 mm			Madera	estancas	44	14	27 dBA
6	Estratificado 1,5 mm	Tablero Aglomerado 34 mm	Estratificado 1,5 mm			Metálico	estancas	40	17	23 dBA
7	Tablero Aglomerado 3,3 mm	Tablero Aglomerado 3,3 mm	Tablero Aglomerado 3,3 mm			Madera	no estancas	40	23	23 dBA

Puede observarse cómo las puertas 1 y 5 a pesar de tener una masa muy pequeña consiguen unos valores de aislamiento muy altos, consecuencia de aplicar el efecto masa-resorte (elevada masa en los paramentos y gran elasticidad en el alma, todo ello rígidamente unido).

El caso de la puerta formada por una chapa metálica el aislamiento es también elevado, pero gracias a la elevada masa.

También debe apreciarse cómo la puerta 4 y 7 tienen el mismo diseño excepto en que una dispone de juntas de estanqueidad y la otra no. La diferencia de aislamiento conseguido es de 5 dBA.

acristalamiento, el número de láminas de vidrio y la distancia entre láminas.

1.1.2.—Ventanas dobles

Las ventanas dobles no responden a las condiciones anteriores por lo expuesto anteriormente, por ello para calcular el aislamiento acústico se suele recurrir a la tabla 3,5 del Anexo 3 de la Norma en la que se detalla dicho valor según el tipo de permeabilidad al aire de la carpintería, el número de vidrios, su espesor y la masa unitaria del acristalamiento.

1.2.—Puertas

El aislamiento del sonido de las puertas viene determinado principalmente por su masa, aunque también influya su permeabilidad y rigidez. Por ello en la práctica el cálculo se suele realizar aplicando fórmulas en las que el aislamiento es función logarítmica de la masa por unidad de superficie de la puerta.

Así, para puertas macizas $R = 16{,}6 \log . m - 8$, con lo que el caso de que el material sea madera el valor que se suele obtener sea de 14 a 17 dB.

Para el caso de puertas construídas por láminas, la fórmula a aplicar es: $R = 16{,}6 \log m - 3$, que aplicado al caso de puertas planas el valor oscila entre 10 y 15 dB.

En ambas ecuaciones se ha supuesto que las puertas van provistas de juntas de estanqueidad. En el caso de que no lleven estas juntas, disminuye, en un valor de alrededor de 5 dB, de ahí la importancia de que posea esta circunstancia.

Si se quiere dotar a las puertas de mejores características de aislamiento acústico, deberá recurrirse a diseños especiales, determinando el valor alcanzado mediante ensayo.

En el cuadro de la página anterior se describen las características de puertas con ciertas características especiales de aislamiento, con los valores alcanzados (según Cahier du C.T.B. n.º 108).

2.—Aislamiento de los sonidos propagados por el material, por impacto sobre éste

Si se golpea una pared con un martillo, la energía aplicada sobre éste se invierte en hacer vibrar a la pared, que se transmite a través del material a toda la estructura del edificio que a su vez va transformando la vibración en sonido a los espacios aéreos adyacentes.

La aptitud de los materiales a la transmisión de las vibraciones depende exclusivamente de su rigidez y densidad, aumentando con el valor de ambos.

Si una vibración incide desde un medio de gran rigidez y densidad a otro sin estas características, la mayor parte de esta energía vibratoria se refleja a través del primer material, pasando al segundo una muy pequeña parte, tanto menor cuanto mayor sea la diferencia de rigidez y densidad de ambos materiales. Por ello, teóricamente, el aislamiento de los ruidos producidos por impacto se debería realizar, interrumpiendo la continuidad rígida de la estructura, con materiales, tales como la goma, el corcho, etc.

Como esta interrupción no se puede realizar por cuestiones de estabilidad del edificio, el aislamiento se debe conseguir no en el momento de la transmisión de la vibración por la estructura, sino en el momento de su transformación en sonido, al transmitir la vibración a los espacios aéreos adyacentes. Este aislamiento se rige por los mismos factores señalados en 1, esto es, fundamentalmente por la masa de la pared y por la frecuencia característica de ésta.

Para el caso de que el elemento constructivo sea un techo o un suelo, el nivel de ruido por impacto (Ln) sobre este, se calcula según la Norma, aplicando la siguiente fórmula

$$L_N = 135 - R$$

siendo R el aislamiento acústico del forjado al ruido aéreo.

Al valor obtenido se debe descontar la amortiguación al impacto que puede proporcionar el pavimento y el falso techo si lo hay.

La amortiguación del pavimento será mayor cuanto más elástico sea el material.

3.—Absorción acústica

Aunque la Norma Básica no indica ninguna exigencia sobre este tema, se va a indicar este fenómeno físico que muchas veces se confunde con el aislamiento acústico y que es precisamente lo contrario.

Aislamiento acústico de una pared es la diferencia entre los niveles de intensidad acústica a un lado y otro de la pared. Es decir mide la mejora acústica que proporciona la pared frente a los ruidos procedentes del otro lado de esa pared (ruidos exteriores).

Absorción acústica de una pared es la relación entre la intensidad acústica absorbida por la pared y la que ha incidido sobre dicha pared. Es decir, mide la mejora que proporciona la pared frente a los ruidos producidos en ese mismo lado de la pared (ruidos interiores).

La absorción acústica, al contrario del aislamiento acústico, será mayor cuanto más poroso sea el material, ya que como se indicó en el punto 1, la absorción indica la cantidad de energía vibratoria que se transforma en calor como consecuencia del rozamiento del aire con las superficies del material. Naturalmente a mayor superficie (mayor porosidad) mayor absorción.

La absorción acústica, también depende de la frecuencia del sonido, aumentando en general con ésta.