

aislamiento acústico

J. M. TOBIO, Departamento de Metrología del I.E.T.c.c.

sinopsis

Se trata un tema muy concreto de la Acústica Arquitectónica, el aislamiento, haciendo hincapié en los fundamentos teóricos del fenómeno y estableciendo las fórmulas más sencillas que permiten calcular fácilmente las pérdidas de transmisión de un material o disposición constructiva aislante.

Varias gráficas y ábacos permiten abordar, sin ningún tratamiento matemático, el problema práctico del aislamiento, aprovechando los materiales comunes y sin ocasionar gastos que graven sustancialmente el importe del proyecto.

Por último, se hace un estudio crítico de las normas y su incidencia en los problemas del aislamiento de viviendas, incluyendo datos referentes a la nueva Ordenanza del Ayuntamiento de Madrid.

343-2

0. Generalidades

Aunque parezca increíble, en los momentos actuales aún existen muchas personas que confunden el aislamiento acústico con el acondicionamiento; que no distinguen bien entre las leyes que rigen el aislamiento térmico y el acústico; que piensan que un determinado material puede servir al mismo tiempo para insonorizar y para protegernos de los cambios térmicos.

Y ello, a pesar de las aclaraciones de las autoridades, escuelas, industrias, artículos aparecidos en revistas técnicas y tratados excelentes sobre la materia [ver bibliografía (1), (2), (3), (4), (17), (18), (19)].

La finalidad principal de estas líneas no es otra que poner de manifiesto el verdadero alcance de la técnica del aislamiento acústico, estableciendo sus bases teóricas, para deducir de ellas las aplicaciones prácticas y prevenir al usuario de la realización de esfuerzos y gastos inútiles derivados, principalmente, del mal empleo de los materiales.

Nuestra experiencia en el Departamento de Metrología —del cual la Acústica es sólo una parte— nos muestra que es mucho más frecuente de lo que sería deseable, el que un constructor instale sobre sus muros, tabiques, forjados, etc., cientos de m² de material poroso —corcho, mineral o plástico— cuya aportación al aislamiento del elemento ha de ser, en el mejor de los casos, nula.

Ahora que se ha constituido la Sociedad Española de Acústica, de la cual es miembro el Instituto Eduardo Torroja, parece oportuna la publicación de estas notas, cuyos antecedentes habría que buscarlos en publicaciones que, en su día, cumplieron una finalidad y que, en su mayor parte, tienen aún hoy plena vigencia (5), (6), (7).

I. Aislamiento sonoro

Consiste en impedir la propagación del sonido por medio de obstáculos reflectores. Aun cuando es difícil imaginar un material absolutamente reflectante —sin que absorba algo de energía—, en nuestro estudio descartaremos todas aquellas sustancias que la técnica acústica califica como «absorbentes».

I.1. Símbolos y definiciones

Los símbolos incluidos a continuación llevan implícitas, en muchos casos, las definiciones principales de acústica que, por otra parte, pueden encontrarse descritas en (6).

I = Intensidad sonora. Potencia acústica por unidad de superficie (W/cm^2).

P = Presión sonora. La ejercida por las ondas sonoras en el aire (compresiones y depresiones). (Dinas/ cm^2 o microbars).

ρ = Densidad (kg/m^3); densidad del aire; peso específico (kp/m^3).

c = Velocidad del sonido en el aire (m/seg; cm/seg).

v = Velocidad del sonido en un medio material cualquiera (m/seg).

N_I = Nivel de intensidad sonora: $N_I = 10 \log \frac{I_1}{I_2}$ (db).

N_P = Nivel de presión sonora: $N_P = 10 \log \frac{P_1^2}{P_2^2} = 20 \log \frac{P_1}{P_2}$ (db).

τ = Coeficiente de transmisión de una pared: $\tau = \frac{I_t}{I_i}$ (Relación de intensidades sonoras, transmitida e incidente).

TL = Pérdidas de transmisión (aislamiento) de una pared: $TL = 10 \log \frac{1}{\tau}$ (db = $10 \log \frac{I_i}{I_t} = 20 \log \frac{P_i}{P_t}$ (db).

\overline{TL} = Pérdidas de transmisión medias; media aritmética de TL para las frecuencias 125, 250, 500, 1.000 y 2.000 Hz.

f = Frecuencia (Hz).

f_c, f_0 = Frecuencia crítica (Hz).

ω = Frecuencia angular ($\omega = 2 \pi f$, radianes/seg).

f_r = Frecuencia de resonancia (Hz).

E = Módulo de Young (kp/cm^2).

λ = Longitud de onda: $\lambda = \frac{v}{f}$ (m o cm).

M = Masa (o peso) por unidad de superficie (kg/m^2 , kp/m^2).

Φ = Angulo de incidencia (radianes o grados).

Z = Impedancia acústica: $\frac{\text{Presión}}{\text{Velocidad}} = j \omega M$ (ohmios acústicos, Rayl).

(ρc) = Impedancia acústica del aire = 41 ohmios (cgs); 410 Rayls (MKS).

h = Espesor (m o cm).

d = Distancia, separación (m o cm).

1.2. Algunas relaciones teóricas

La figura 1 representa el caso más general de transmisión de una onda sonora a través de una pared.

Una onda incidente golpea sobre una placa, tabique, muro o panel de espesor h y masa M , con un ángulo de incidencia, respecto a la normal, Φ . El panel entra en vibración por la acción de la onda incidente y, al mismo tiempo, vibra en flexión, tal como indica la figura 1.

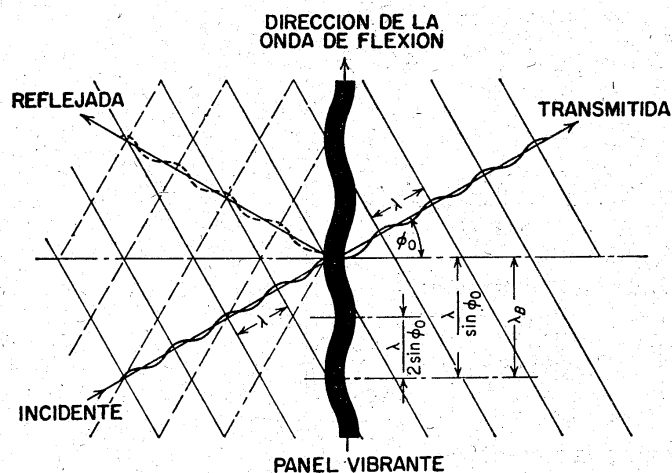
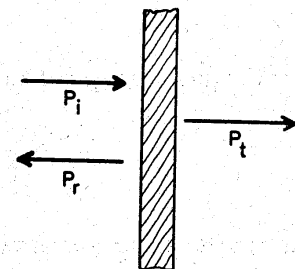


Fig. 1. Comportamiento de un panel frente a una onda incidente.

Fig. 2. Penetración del sonido a través de una placa (P_i , presión sonora incidente; P_r , presión reflejada; P_t , presión transmitida).



La figura 2 muestra una simplificación del caso general. La onda incidente y la reflejada son perpendiculares al plano del panel ($\Phi = 0$) y lo mismo la onda transmitida.

Si el espesor de la placa es pequeño (en relación con la longitud de onda) y se prescinde de los efectos de borde, la impedancia acústica de la placa, relación entre la diferencia de presiones acústicas en ambos lados del panel y velocidad de la onda, será (ver I.1):

$$Z = \frac{P_i + P_r - P_t}{v} = j \omega M . \quad [1]$$

Además, resulta evidente que:

$$P_t = P_i - P_r = (\rho c) v \quad [2]$$

(ρc) = impedancia acústica del aire.

De las fórmulas [1] y [2] se deduce fácilmente que:

$$P_r = \frac{j \omega M v}{2} \quad \text{y} \quad P_t = (\rho c) v . \quad [3]$$

De éstas y la [1]:

$$P_i = \frac{j \omega M v}{2} + (\rho c) v . \quad [4]$$

La relación de presiones acústicas es:

$$\frac{P_i}{P_t} = 1 + j \frac{\omega M}{2(\rho c)} . \quad [5]$$

El módulo del complejo del segundo miembro de [5] valdrá:

$$\left| 1 + j \frac{\omega M}{2(\rho c)} \right| = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{4(\rho c)^2}} .$$

De este valor y la [5] deducimos:

$$\left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = 1 + \frac{\omega^2 M^2}{4(\rho c)^2} ,$$

y teniendo en cuenta la definición de TL de las I.1, resulta:

$$TL = 10 \log \left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = 10 \log \left(1 + \frac{\omega^2 M^2}{4(\rho c)^2} \right) . \quad [6]$$

Sin mucho error puede ponerse la [6] bajo la forma:

$$TL = 20 \log M + 20 \log f - 23 . \quad [7]$$

La [7], que sólo es válida para frecuencias que estén por encima de la frecuencia de resonancia de la pared, que desprecia los efectos de borde del panel y que no tiene en cuenta la rigidez del material, nos muestra:

- a) Que las TL aumentan con el peso (o masa) del panel en kp/m^2 .
- b) Que el aislamiento crece con la frecuencia.

Si la incidencia no es normal, como en la figura 2, sino oblicua como en la figura 1, es preciso introducir un factor, $\cos \Phi$, en la [6], con lo que las pérdidas de transmisión quedan:

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{\omega^2 M^2 \cos^2 \Phi}{4(\rho c)^2} \right) , \quad \text{en db.} \quad [8]$$

La [8] muestra que el aislamiento será menor para la incidencia oblicua y que, en el caso límite ($\Phi = 90^\circ$), el aislamiento será nulo. Esto no tiene sentido en la práctica, pues sólo sería posible con dimensiones de la pared muy grandes.

Para paredes muy gruesas las fórmulas [6] y [8] no son válidas, porque entonces ya no se puede suponer que ambas caras del panel vibran en fase. Dicho de otro modo, es preciso considerar la propagación dentro del muro y no suponer que solamente transmite la vibración.

Según Lord Rayleigh («Theory of Sound», pág. 271), la fórmula final para el aislamiento de muros gruesos es:

$$TL = 10 \log \left[\cos^2 \frac{\omega}{v} h + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_v}{(\rho c)} + \frac{(\rho c)}{Z_v} \right)^2 \sin^2 \frac{\omega}{v} h \right], \quad [9]$$

en la que h es el espesor del muro; ρ_v , su peso específico; v , la velocidad del sonido en el material, y $Z_v = \rho_v v$, la impedancia característica del mismo.

Si se supone que el espesor h es pequeño comparado con la longitud de onda, y que $(\rho c) \ll Z_v$, la [9] se sustituye por la [6].

Para ángulos de incidencia Φ «al azar», comprendidos entre 0° y 90° , la [10] puede ser utilizada:

$$(TL)_{90^\circ}^{0^\circ} = (TL)_{0^\circ} - 10 \log 0,23 (TL)_{0^\circ}, \quad \text{en db}, \quad [10]$$

en la que $(TL)_{0^\circ}$ es el aislamiento para incidencia normal dado por la [7].

I.3. La ley de masa

La ecuación [7] puede representarse como en la gráfica 1 de la figura 3, que da el aislamiento en db en función del peso en kp/m^2 («Ley de masa»). Los ensayos llevados a cabo por diversos laboratorios y con distintos tipos de materiales, indican que las cifras de aislamiento encontradas en la práctica son más bajas que las dadas por la ley de masa.

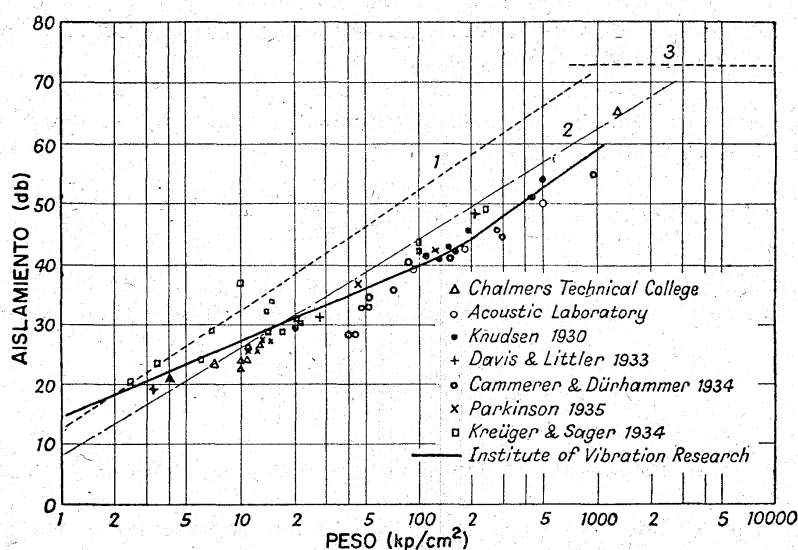


Fig. 3. Aislamiento por la ley de masa: (1), curva teórica; (2), curva experimental (media de 8 laboratorios).

Otra forma de ver cómo se apartan los materiales ordinarios de la ley de masa es la representación gráfica de la figura 4, debida a Beranek (3), que da, en general, las pérdidas de transmisión en función de la frecuencia y no del peso del panel.

Pueden verse tres regiones, I, II y III. En la I, las resonancias propias del panel y su rigidez gobiernan el aislamiento; la región II sigue la ley de masa con una inclinación de 6 db/oc-

tava; la región III está gobernada por la coincidencia de ondas (ver I.4) y en ella aparece la frecuencia crítica, f_c (ver I.5).

Resumiendo, podemos decir que la rigidez de un panel es importante para determinar la cantidad de sonido radiado por debajo de la más baja frecuencia de resonancia y por encima de la frecuencia crítica. Entre estas dos regiones el panel puede ser tratado, con cierta aproximación, de acuerdo con la ley de masa.

I.4. Coincidencia de ondas

Volvemos a la figura 1. No puede resultar sorprendente que cuando una onda sonora suficientemente intensa incide sobre una placa, aparte de transmitirse a la otra cara de la misma, tal como ha sido estudiado en I.3, provoque en dicha placa una vibración a flexión, con una cierta longitud de onda λ_B .

Para una placa rectangular de lados a y b , soportada pero no sujeta en sus cuatro bordes, de espesor h y peso M (kp/cm²), la teoría elástica (8) da las frecuencias de vibración mediante la fórmula:

$$f_r = \sqrt{\frac{\pi^2 E h^3}{48 M (1 - \mu^2)} \left[\left(\frac{q_1}{a} \right)^2 + \left(\frac{q_2}{b} \right)^2 \right]^2}, \quad \text{en Hz,} \quad [11]$$

en la que f_r es la frecuencia de resonancia; E , el módulo elástico, y μ , el coeficiente de Poisson; q_1 y q_2 son números enteros (1, 2, 3...).

Cuando $q_1 = q_2 = 1$ tenemos la más baja frecuencia natural de la placa o frecuencia de resonancia fundamental. Puede verse que, siendo otros parámetros iguales, la frecuencia fundamental aumenta con el espesor de la pared.

Si tenemos en cuenta la relación entre la velocidad de propagación de la onda longitudinal en la placa v_L y el módulo de Young

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_p (1 - \mu^2)}}, \quad [12]$$

(siendo ρ_p = densidad de la placa, en kg/m³), y suponemos que μ vale 1/3, como ocurre en la mayoría de los casos, lo anterior nos permite otra expresión para la frecuencia de resonancia (3):

$$f_r = 0,45 v_L h \left[\left(\frac{q_1}{a} \right)^2 + \left(\frac{q_2}{b} \right)^2 \right], \quad \text{en Hz.} \quad [13]$$

Como en la [11], la frecuencia fundamental de resonancia se obtiene para $q_1 = q_2 = 1$.

La representación gráfica de la figura 1, en la que están representadas las longitudes de onda de la onda sonora y de la placa que vibra, nos muestra que, para un cierto ángulo de incidencia Φ_0 , la onda incidente de longitud λ viaja desde la parte inferior izquierda y golpea el panel poniéndolo en vibración.

La vibración resultante aparece como una onda de flexión viajando hacia arriba, con longitud de onda $\lambda/\text{sen } \Phi_0$.

Si λ es menor que λ_B ocurre que, para un valor particular de Φ_0 , es posible que $\lambda/\text{sen } \Phi_0$ sea igual a λ_B . En esta condición, el panel vibra con una amplitud casi igual a la amplitud de las partículas de aire que, por la acción de la onda sonora, inciden sobre la placa.

A su vez, el panel radiará, por su cara derecha, una onda transmitida con una amplitud casi igual a la de la onda incidente.

Dicho de otro modo, el panel radia una onda casi tan intensa como la que trata de aislar. Lo que es tanto como decir que, para un valor determinado de λ (y por tanto de la frecuencia) y de Φ_0 , las TL son prácticamente nulas.

Esta condición viene dada por:

$$\text{sen } \Phi_0 = \frac{\lambda}{\lambda_B} \quad [14]$$

Es obvio que si la longitud de onda del sonido en el aire es mayor que la longitud de onda del sonido en la placa no puede ocurrir la coincidencia, puesto que $\text{sen } \Phi_0 > 1$.

Para una frecuencia dada f , tendremos:

$$c = \lambda f \quad ; \quad c_B = \lambda_B f \quad ; \quad \text{sen } \Phi_0 = \frac{c}{c_B} \quad [15]$$

en la que c_B y c son las velocidades de propagación de la onda sonora en el material y en el aire, datos perfectamente conocidos por las tablas.

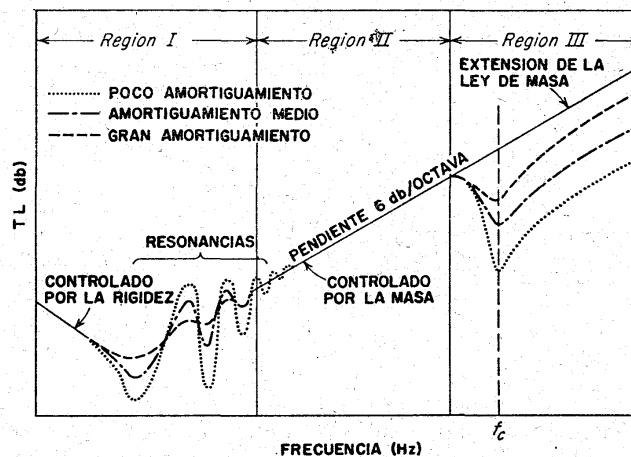


Fig. 4. Pérdidas de transmisión en función de la frecuencia: (I), región gobernada por la rigidez y resonancias; (II), ley de masa; (III), coincidencia de ondas.

Si se fija la frecuencia, el ángulo Φ_0 para el cual tiene lugar la coincidencia se denomina «ángulo de coincidencia». Cuando se fija el ángulo, la frecuencia a que tiene lugar el fenómeno se llama «frecuencia de coincidencia». Las gráficas de la figura 6 muestran estas frecuencias para algunos materiales.

1.5. Frecuencia crítica

Se define como la más baja frecuencia a la cual la coincidencia tiene lugar, y es aquella para la que $\lambda_B = \lambda$, o, lo que es lo mismo, de la [15], $c_B = c$; $\text{sen } \Phi_0 = 1$.

Cuando la longitud de onda de las ondas de flexión es mayor que seis veces el espesor h del panel, la f_c viene dada por:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 h} \sqrt{\frac{\rho_p}{E}}, \quad \text{en Hz,} \quad [16]$$

en la que ρ_p es el peso en kp/m^3 de la placa.

Las gráficas de la figura 5 dan las frecuencias críticas para cinco materiales comunes en función del espesor en cm.

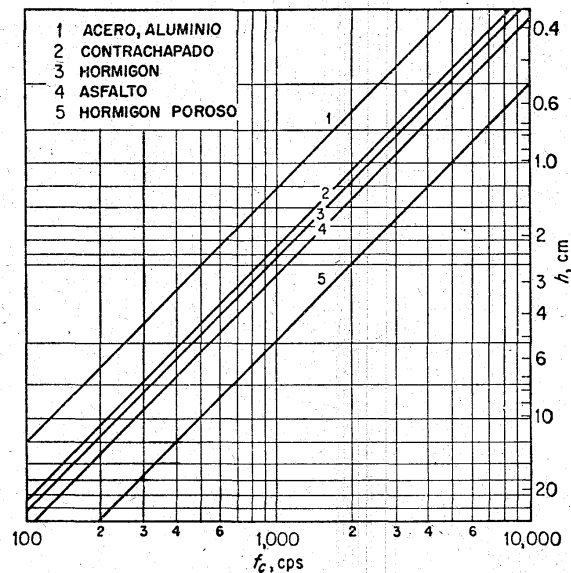


Fig. 5. Frecuencia crítica de algunos materiales.

El concepto de frecuencia crítica tiene gran importancia en cuestiones de aislamiento, dado que representa la frecuencia a la cual las TL son muy pequeñas; prácticamente nulas.

I.6. Expresión general para el aislamiento

Ya hemos visto, por las fórmulas anteriores, que la dependencia entre el aislamiento (TL) para un determinado panel y las variables que intervienen en él, tales como peso (M), ángulo de incidencia (Φ), frecuencia crítica (f_c), frecuencia (f), módulo de Poisson (μ), velocidad de propagación (v), rigidez (que interviene en el amortiguamiento η), es mucho más complicada de lo que suele suponerse cuando se habla del poder aislante (\overline{TL}) de un determinado material.

En la práctica, muchos de los fracasos encontrados al establecer un proyecto de tabique, muro o forjado aislante, se deben al olvido de estas circunstancias que, por otra parte, están empíricamente representadas en la gráfica de la figura 4, de la que ya hemos hablado en I.3.

Se debe a Feshbach (9) una de las expresiones más completas para las TL :

$$TL = 10 \log \left\{ \left[1 + \frac{\omega M}{2(\rho c)} \eta \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \cos \Phi \sin^4 \Phi \right]^2 + \frac{\omega^2 M^2}{4(\rho c)^2} \cos^2 \Phi \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \Phi \right]^2 \right\}; \quad [17]$$

fórmula en la cual todos los parámetros ya nos son conocidos y η es el factor de amortiguamiento, ligado al módulo elástico complejo por la conocida fórmula (10):

$$E^* = E(1 + j\eta). \quad [18]$$

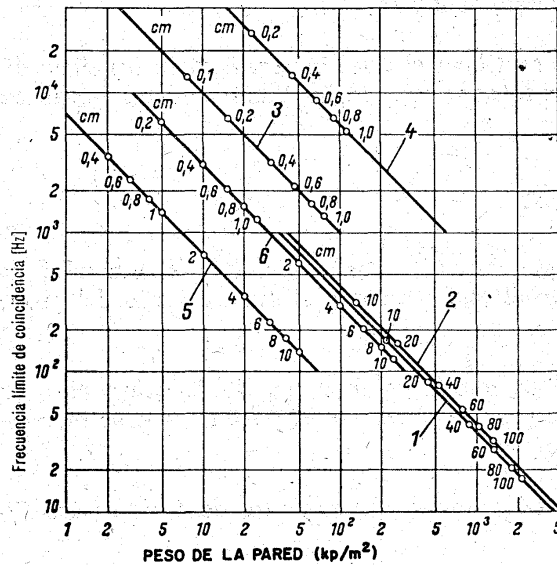


Fig. 6. Frecuencia crítica en función del peso: (1), hormigón; (2), ladrillo; (3), acero; (4), plomo; (5), madera contrachapada; (6), vidrio.

El primer corchete de la [17] da cuenta de la influencia del amortiguamiento/rigidez del material en las TL , mientras que el segundo término está gobernado casi exclusivamente por la masa (o peso) M .

De todo ello se deduce que, al establecer un proyecto de panel aislante, es primordial conocer la función $(TL) = \varphi(f)$, cosa que puede hacerse experimental o empíricamente.

En (6) pueden verse los detalles de funcionamiento de los equipos empleados para obtener las TL en función de la frecuencia, para un panel experimental.

Las determinaciones son bastante engorrosas y, por supuesto, exigen la preparación de una probeta de unos 2×2 m que, en algunos casos, puede llegar a pesar hasta 2.000 kp. El manejo y puesta en situación de uno de estos elementos es una operación cara y molesta.

Para todo el que desee conocer la curva de pérdidas de aislamiento para todo el espectro de frecuencias, en un determinado material, simple o compuesto, lo incluido en el capítulo II puede resultarle sumamente útil. Por otra parte, la operación puede realizarse con gran facilidad y en poco tiempo.

Las simplificaciones que deben hacerse para ello son, generalmente, perfectamente permisibles y no alteran sustancialmente la exactitud o precisión necesarias para la práctica.

II. Realización práctica del aislamiento

En este capítulo se trata de dar fórmulas prácticas (simplificadas) para el cálculo inmediato del aislamiento, así como cierto número de tablas y gráficos de sencilla aplicación que sean de utilidad al proyectista acústico.

Como es lógico, hemos de sacrificar el rigor matemático en beneficio de la facilidad de cálculo y ejecución, ya que, en caso contrario, la finalidad de estas líneas quedaría desvirtuada.

II.1. Elección del material

En las consideraciones que siguen hemos de tener en cuenta casi exclusivamente premisas acústicas antes que constructivas, quedando al buen criterio del proyectista el hacer compatibles unas y otras.

Diremos, en primer término, que la ley de masa (TL mayores para un peso M mayor) constituye un buen punto de partida, pues no es posible esperar buenos aislamientos con tabiques (o forjados) de poco peso.

Como regla general se puede suponer un aumento de 6 db en las TL para una duplicación del peso en kp/m^2 .

Pero ya sabemos que la ley de masa no es el único criterio. Si imaginamos, por ejemplo, una pared de ladrillo macizo que pese 300 kp/m^2 y queremos averiguar sus TL a 160 Hz, la [7] nos daría:

$$TL = 20 \log 300 + 20 \log 160 - 23 = 70 \text{ db.}$$

Pero si hacemos una medida experimental, observamos que el aislamiento real de esta pared a 160 Hz resulta solamente de 40 db. La diferencia es demasiado importante para ser pasada por alto.

Ello depende de que no hemos tenido en cuenta ni el ángulo de incidencia ni la rigidez del material, que se hacen patentes por debajo de la frecuencia crítica (fig. 4).

Para ésta, ya sabemos que el aislamiento es siempre muy pequeño. Interesa, por tanto, que f_c sea lo más alta posible para tener un campo extenso de frecuencias en el que el elemento se comporte con arreglo a la ley de masa.

Las gráficas de la figura 6 muestran las frecuencias críticas para seis materiales diferentes en función del espesor y del peso de la pared en kp/m^2 (11).

Vemos, por ejemplo, que el plomo, para 100 kp/m^2 ofrece una frecuencia crítica de más de 1.000 Hz, mientras que un muro de hormigón, del mismo peso, solamente alcanzaría los 250 Hz. La superioridad del plomo resulta, pues, evidente.

Ello proviene de que con una gran masa, el plomo presenta una baja rigidez a flexión. Los materiales usuales en la construcción —ladrillo y hormigón— son muy rígidos y, por consiguiente, son especialmente desfavorables en lo que respecta a la frecuencia crítica para el campo de frecuencias usual.

Existen sistemas para hacer compatible la elevada masa y la baja rigidez, como son la fabricación de láminas delgadas cargadas con masas pesadas (al tresbolillo), la preparación de placas sandwich y otras que pueden estudiarse en (2). La figura 7 muestra placas de alto peso superficial y rigidez a flexión disminuida por las canales o ranuras.

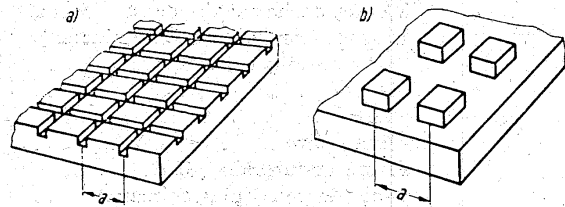


Fig. 7. Placas de alto M y baja rigidez: (a), con ranuras; (b), con masas superpuestas.

II.2. Propiedades físicas de algunos materiales

La tabla I da los pesos superficiales por unidad de espesor para algunos materiales corrientes:

TABLA I. Pesos de materiales

MATERIAL	(kp/m^2)/cm
Aluminio	2.700
Panel de amianto	1.700
Ladrillo	1.900 a 2.300
Hormigón denso	2.300
Hormigón de cenizas	1.500
Hormigón ligero	1.000
Vidrio	2.500
Plomo	11.000
Yeso de perlita (o vermiculita)	1.000
Mortero de yeso (arena)	1.700
Plexiglás	1.150
Arena seca floja	1.300 a 1.500
Arena seca compactada	1.700 a 1.900
Arena húmeda	2.000
Acero	7.700
Madera ordinaria	580 a 1.000
Contrachapado	580

La tabla II incluye, para una serie de materiales, dos constantes importantes, el producto de la masa (o peso) M (kp/m^2) por la frecuencia crítica f_c en Hz, así como el factor de amortiguamiento η (sin dimensiones) a 1.000 Hz, que interviene en las [17] y [18].

TABLA II. Amortiguamiento interno y peso \times frecuencia

MATERIAL	(kp/m^2) \cdot Hz $M \cdot f_c$	Amortiguamiento (η)
Aluminio	34.700	10^{-4}
Ladrillo	34.700 a 58.600	0,01
Hormigón denso	43.900	0,005
Hormigón de clínker (enlucido) ...	48.800	0,005
Bloque de cenizas (cemento), 15 cm.	23.200	0,005
Bloque de hormigón denso, 15 cm.	23.000	0,007
Bloque hormigón (doble enlucido).	42.200	—
Placa hormigón de 10 cm	54.100	0,012
Madera	4.880	0,04
Vidrio	38.800	0,002
Plomo puro	605.000	0,015
Plomo endurecido (Sb)	508.000	0,002
Panel de yeso (plaster-board)	24.500	0,005
Plexiglás	35.400	0,002
Acero	97.500	10^{-4}
Yeso (bloque), 1 a 5 cm	12.700	0,01
Madera tipo Novopán	73.200	—

El aislamiento teórico (ley de masa) para distintos ángulos de incidencia (Φ) para paneles no sujetos por los bordes (o suficientemente grandes), puede obtenerse de las gráficas de la figura 8, en la que está representada la relación $TL - f \cdot M$ para ángulos de incidencia $\Phi = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ - 90^\circ$ (condiciones ideales), así como para ángulos intermedios, que son los que se encuentran en la práctica (ver [7] y [10]).

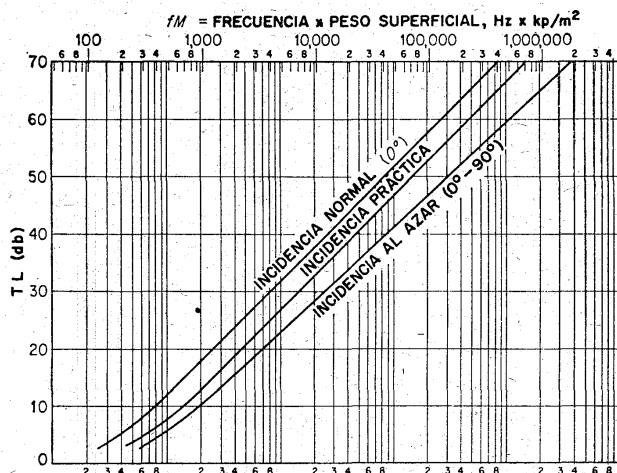


Fig. 8. Curvas teóricas de TL en función del ángulo de incidencia.

II.3. Cálculo de pérdidas en función de la frecuencia

Conociendo las constantes $M \cdot f_c$ y η dadas por la tabla II, las gráficas de la figura 9 permiten el cálculo teórico de las TL. Estas gráficas revelan varios hechos importantes:

- Por debajo de aproximadamente 0,6 de la frecuencia crítica, las TL son independientes del amortiguamiento y dependen casi exclusivamente de A (escala de la parte superior).
- Para $f/f_c = 0,3$, A está relacionada con $M \cdot f_c$ de acuerdo con la curva «incidencia práctica» de la figura 7. (Por ejemplo, si suponemos que $M \cdot f_c = 25.000$ (kp/m²)·Hz, y que $f/f_c = 0,3$, la escala superior nos da $A = 10$ db; en ordenadas, $TL + A = 40$ db; restando A nos queda $TL = 30$ db. Si utilizamos la gráfica de la figura 7 para $M \cdot f = M \cdot 0,3 f_c = 25.000 \times 0,3 = 7.500$, la curva «incidencia práctica» de la figura 8 nos da $TL = 30$ db).

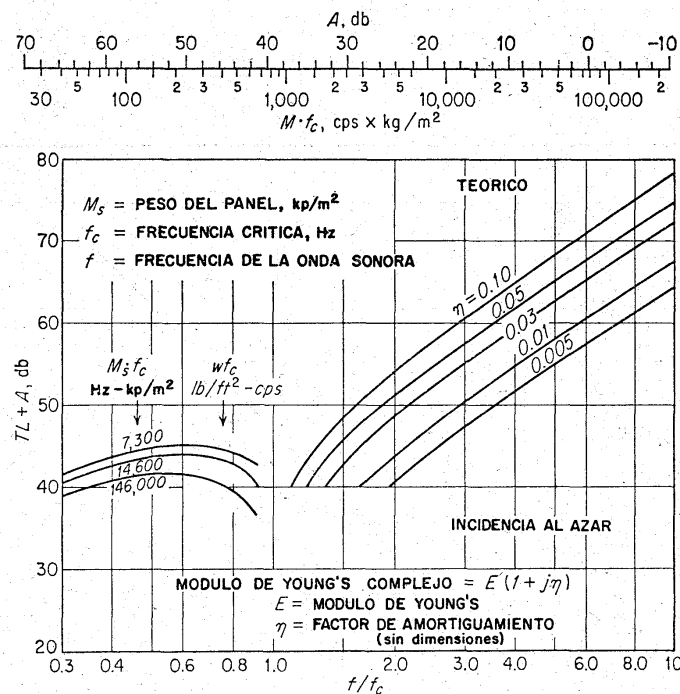


Fig. 9. Pérdidas de transmisión en función de la constante de amortiguamiento.

- Las curvas que aparecen por encima de $f/f_c = 1$ son sensiblemente paralelas y el aumento en las TL viene a ser de 10 db al doblar la frecuencia.
- En la práctica —con elementos de construcción comunes— se observa que la región de TL comprendida en f/f_c de 1 a 2 (ver fig. 8), no suele descender por debajo de $TL + A = 36$ db, ni subir más allá de los 44 db.

Habida cuenta de las observaciones anteriores, puede intentarse dibujar la gráfica de TL-frecuencia para cualquier material, gracias al nomograma de Watters (12), reproducido por Beranek (3) (fig. 10).

El sistema es muy sencillo: Vamos a dibujar una curva similar a la de la figura 4. La región a la izquierda de A viene determinada por la gráfica «incidencia práctica» de la figura 8. El tramo horizontal A-B viene dado, en altura y ancho, por los datos de la tabla III:

TABLA III. Datos para la figura 10

MATERIAL	(kp/m ²)/cm (M/cm)	Altura tramo (db)	Ancho (Relación de frecuencias)
Aluminio	26,6	29,0	11,0
Hormigón denso	22,8	38,0	4,5
Vidrio	24,7	27,0	10,0
Plomo	112,0	56,0	4,0
Mortero de yeso	17,1	30,0	8,0
Contrachapado	5,7	19,0	6,5
Acero	76,0	40,0	11,0
Ladrillo	21,0	37,0	4,5
Bloque de cenizas	11,4	30,0	6,5

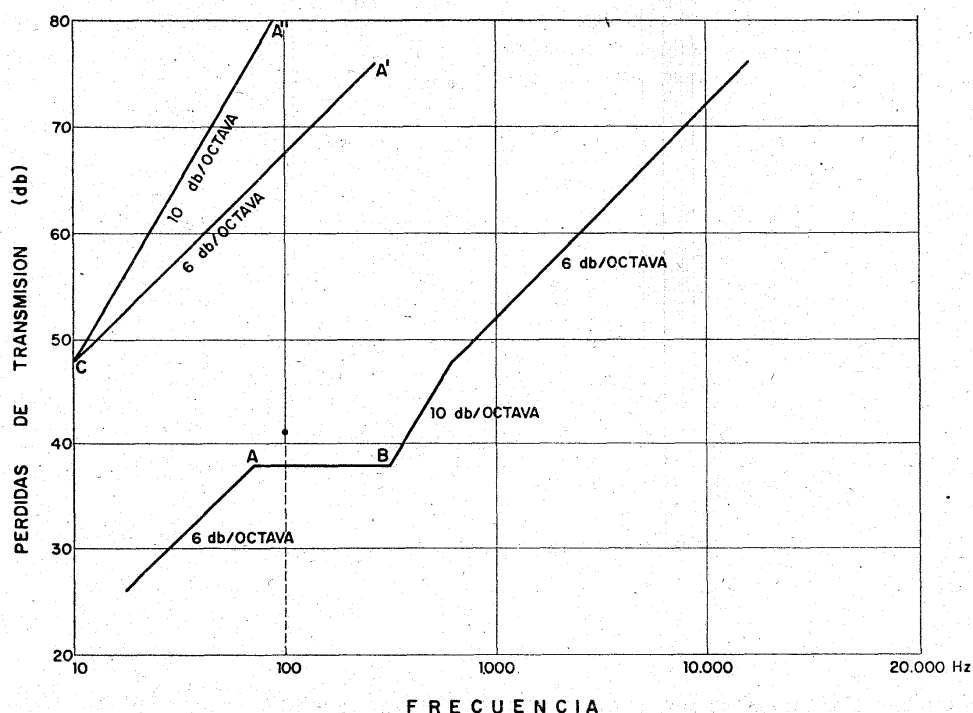


Fig. 10. Cálculo práctico de la curva de aislamiento (según Watters).

La curva es válida solamente para frecuencias «por encima» de la más baja frecuencia de resonancia.

Prepárese un trozo de papel similar al de la figura 10, poniendo en abscisas «frecuencia, Hz», y en ordenadas, «TL, db». Obsérvese que la escala de frecuencias es logarítmica de tal modo

que cada octava (doble de frecuencia) tiene la misma longitud. La escala de ordenadas es lineal. (Puede utilizarse papel semilogarítmico; la escala de TL puede ser cualquiera).

La curva se dibuja del modo siguiente:

- a) Conocido el material y los datos de la tabla III, se halla el peso del panel en kp/m^2 . Por ejemplo, para un muro de hormigón de 10 cm de espesor esta cifra será: $22,8 \times 10 = 228 \text{ kp/m}^2$.
- b) De la curva central de la figura 8 determinaremos las TL para una frecuencia cualquiera. En el ejemplo mencionado, para 100 Hz, será: $228 \times 100 = 22.800 \text{ Hz} \cdot (\text{kp/m}^2)$. Con este valor en abscisas (fig. 8) determinamos: $TL = 41 \text{ db}$.
- c) En el punto 100 Hz (fig. 10), marcamos los 41 db y por este punto trazamos una recta inclinada con pendiente de 6 db/octava (paralela a la recta $C-A'$).
- d) De la tabla III determinamos la altura del tramo $A-B$ para el material, en este caso hormigón, que resulta ser: altura = 38 db. Esta línea horizontal corta a la dibujada anteriormente en el punto A .

El punto de 100 Hz que determinamos en la etapa c) estaba a 41 db; la diferencia $41 - 38 = 3 \text{ db}$, equivale a $3/6 = 1/2$ octava. Luego el punto A caerá $1/2$ octava debajo de 100 Hz, es decir, 70 Hz.
- e) Partiendo de A hacia la derecha, dibújese el tramo horizontal $A-B$ con un ancho que nos da también la tabla III. En nuestro caso, para el hormigón, la relación de frecuencias es 4,5. Luego el ancho del tramo será: ancho = $70 \times 4,5 = 315 \text{ Hz}$. El punto B caerá, pues, en 315 Hz.
- f) A partir de B , hacia la derecha, dibújese una recta inclinada a 10 db/octava (paralela a la recta $C-A''$), para la primera octava, es decir, hasta los 630 Hz, bajando la inclinación a 6 db/octava para el resto de la gráfica.

Así queda dibujada la curva TL -frecuencia para el muro de hormigón de 10 cm de espesor. Para usos comunes, esta gráfica es suficientemente exacta y, como antes dijimos, sólo válida por encima de la más baja frecuencia de resonancia del panel.

III. Los materiales porosos como aislantes

La técnica moderna —especialmente la de los plásticos— ha introducido en el mercado una gran variedad de materiales porosos o ligeros que han venido a sumarse a los «clásicos»: corcho, lana mineral, lana de vidrio, aglomerados de virutas, fieltro, placas de amianto conglomerado, hormigón aireado, yesos porosos, etc.

Estos plásticos se ofrecen en forma de espumas rígidas o semi-rígidas, flexibles, espuma de caucho, espumas «in situ» (que se forman por la acción de dos o más componentes) y, en general, bajo la forma de planchas o mantas de muy baja densidad y constituidas por alvéolos individuales, no comunicados, rellenos de aire o de un gas inerte cualquiera.

La mayoría de estos materiales —cuya utilidad como aislantes térmicos está fuera de duda— se anuncian, ¡inexplicablemente!, como aislantes acústicos.

No tiene, pues, nada de particular, que muchos proyectistas enfrentados con una medianería, un tabique, o un forjado cuyo aislamiento acústico resulta insuficiente, traten de resolver el problema adosando, a uno de estos elementos de cerramiento, una manta o panel plástico muy ligero.

Los resultados suelen ser catastróficos. En el caso más favorable, la mejora conseguida está muy lejos de lo esperado. Las más de las veces es prácticamente nula.

Esto no quiere decir que tales sustancias sean prácticamente inútiles en el campo acústico. Algunas de ellas resultan interesantes como acondicionantes acústicos (tema no tratado aquí), especialmente las de poro abierto, y como materiales de relleno en dobles tabiques (ver capítulo IV).

III.1. Pérdidas de transmisión en láminas porosas

Consideremos el caso en que el panel de la figura 2 es un material ligero, poroso, más o menos rígido: la onda sonora, bajo incidencia normal, actúa sobre la cara izquierda del panel y aparece con amplitud reducida por la cara derecha.

Para el estudio completo consideraremos, con Beranek (3), tres regiones del espectro de frecuencias, A, B y C. La región A corresponde a las bajas frecuencias y es aquella donde el espesor h del panel poroso es menor que 0,1 de la longitud de onda del sonido en el panel, es decir, $h < 0,1 \lambda$.

Las TL para esta región vienen dadas por:

$$TL = 10 \log \left\{ 1 + \frac{R_f \left(\frac{\omega M}{\rho c} \right)^2 \left(4 + \frac{R_f}{\rho c} \right)}{4 \left[\left(\frac{R_f}{\rho c} \right)^2 + \left(\frac{\omega M}{\rho c} \right)^2 \right]} \right\}, \text{ en db,} \quad [19]$$

en la que R_f es la resistencia al flujo (gaseoso) del panel (en Rayls).

Se demuestra (4) que, a estas frecuencias, el factor principal que gobierna el aislamiento es el peso/m² (M), por lo que resulta aplicable la [6]. Dado que tanto M como f son pequeños, no hay que esperar valores altos del aislamiento.

Así, por ejemplo, una manta de lana de vidrio de una densidad de 160 kg/m³, con un espesor de 5 cm, poseerá a 50 y 100 Hz unas TL de 10 y 12 db, respectivamente.

Para frecuencias altas, superiores a 400 Hz (región C), las TL vienen dadas por:

$$TL \approx 10 \log \left[1 + \frac{R_f}{2P(\rho c)} \right]^2, \quad [20]$$

siendo P la porosidad $\left(= \frac{\text{volumen de huecos}}{\text{volumen total}} \right)$,

y están gobernadas principalmente por esta magnitud. En efecto, un material muy poroso poseerá una P alta y, al mismo tiempo, una R_f baja (fórmula [20]).

A modo de ejemplo, la tabla IV da las *TL* de una manta de fibra de vidrio de 5 cm de espesor y 160 kg/m³.

TABLA IV. Pérdidas de transmisión de un material poroso

Frecuencia (Hz)	50	100	200	400	800	1.600	3.200
TL (db)	10,0	12,0	12,0	12,2	14,2	18,2	21,0

Los valores correspondientes a la región *B* (intermedia) pueden ser interpolados. Para ensayos de tanteo pueden servir las gráficas de la figura 11, que dan la constante de atenuación, en db/cm, para seis tipos de materiales porosos de los cuales se conoce su densidad aparente, en kg/m³.

Así, para una manta de lana de roca de 64 kg/m³ se puede contar con una atenuación de 2 db/cm. Lo cual quiere decir que las *TL* de una manta de 10 cm de espesor serán 20 db (a 1.000 Hz). A frecuencias bajas, la atenuación es mucho menor.

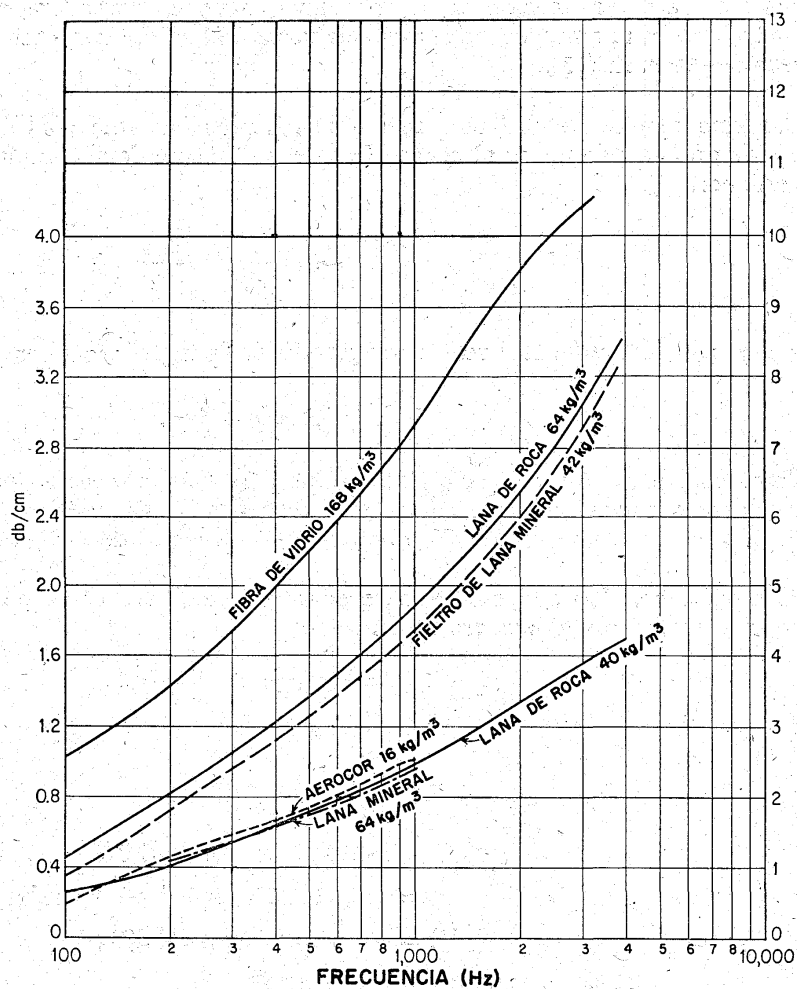


Fig. 11. Constantes de atenuación para materiales porosos.

En cualquier caso, y para cálculos seguros, no conviene olvidar que una manta porosa adosada a un tabique no supondrá mejora apreciable en el aislamiento, a menos que su espesor sea superior a 10 veces la longitud de onda en el panel ($\lambda \approx 15$ cm, a 1.000 Hz) (3).

Esto elimina prácticamente cualquier posibilidad en este sentido. Un simple enfoscado de yeso, mucho más barato y de espesor infinitamente menor ($\approx 1,5$ cm), dará mejores resultados que la susodicha manta.

III.2. El hormigón poroso

Las excelentes propiedades aislantes (acústicas) del hormigón denso (ordinario) han quedado establecidas a lo largo de este trabajo y, además, pueden encontrarse tabuladas en (6) (página 130) para espesores de 10 a 30 cm.

Con muros de esta clase es fácil obtener \overline{TL} de 46 a 54 db, con máximos de 67 db (a frecuencias altas).

En el Departamento de Metrología se hicieron algunas experiencias con hormigones aireados (porosos) para densidades aparentes de 330 a 600 kg/m³. Una parte de estas experiencias consistió en la determinación de la impedancia acústica verdadera de muestras de estos materiales, con el aparato de ondas estacionarias del equipo acústico del I.E.T., según la técnica recomendada en (13).

Con esta técnica se obtienen, mediante cálculos bastante complicados, los valores α , n , p y q de probetas de material poroso [α es el coeficiente de absorción, n la impedancia reducida verdadera

$$\left(n = \frac{Z}{(\rho c)} = \frac{Z}{410} \right)$$

y p y q los componentes real e imaginario de la impedancia compleja]:

$$\vec{Z} = p + j q . \quad [21]$$

Para relacionar la impedancia $|Z|$ con las pérdidas de transmisión emplearemos la [9], adecuada para muros gruesos. Las probetas empleadas en nuestros ensayos tenían un espesor de 60 mm, un diámetro de 100 mm y pesos específicos de 330, 400, 500 y 600 kp/m³.

Para aplicar la [9] debemos establecer un sistema homogéneo de unidades y, al mismo tiempo, hacer alguna pequeña transformación:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 2 \pi f = 6,28 f, & \text{en Hz;} \\ h &= 0,06 \text{ m;} \\ v &= \frac{|Z|}{\rho_v}, & \text{en m/seg;} \\ Z_v &= n \cdot 410, & \text{en Rayls (MKS);} \\ \rho_v &= 330, 400, 500, 600, & \text{en kp/m}^3; \\ (\rho V) &= 410, & \text{en Rayls (MKS);} \\ \text{grados} &= \text{Radianes} \times 57,3. \end{aligned} \right\} [22]$$

Con las [22], la [9] queda:

$$TL = 10 \log \left[\cos^2 \frac{0,0527 \rho_v f}{n} + \frac{1}{4} \left(n + \frac{1}{n} \right)^2 \sin^2 \frac{0,0527 \rho_v f}{n} \right]. \quad [23]$$

Los parámetros f , ρ_v y n , hallados experimentalmente, permiten obtener, con ayuda de un calculador NCR 803, los valores de la tabla V:

TABLA V. Poder aislante de un hormigón poroso

Frecuencia (Hz)	ρ_v (kg/m ³)	n	TL (db)	ρ_v (kg/m ³)	n	TL (db)	ρ_v (kg/m ³)	n	TL (db)	ρ_v (kg/m ³)	n	TL (db)
100	330	34	22,5	400	46	24,4	500	48	25,9	600	48	26,8
200	330	18	7,2	400	36	24,1	500	34	17,2	600	34	6,2
400	330	10	7,1	400	33	24,1	500	34	22,3	600	31	21,3
800	330	18	17,2	400	28	21,9	500	38	13,9	600	31	23,8
1.000	330	20	14,2	400	28	17,7	500	48	11,7	600	30	16,4
2.500	330	11	1,8	400	15	17,5	500	23	10,4	600	19	10,8
3.150	330	8	9,3	400	19	19,3	500	29	13,2	600	36	24,4

Una vez más se confirma, en esta ocasión experimentalmente, la baja calidad aislante de los materiales porosos. En efecto, las TL medias para las cuatro muestras ensayadas oscilan entre 11 y 21 db, lo cual supone valores demasiado bajos para que resulte práctico su empleo. Estos mismos hormigones, enlucidos con yeso por ambas caras, ya podrían resultar interesantes como aislantes, como veremos en el apartado siguiente.

III.3. Paneles «sandwich»

La unión de un panel poroso a una placa (tabique o muro) rígida, es un sistema constructivo bastante común y del cual suelen obtenerse excelentes resultados desde el punto de vista del aislamiento térmico.

Sin embargo, la mejora que puede lograrse respecto al aislamiento acústico es siempre dudosa y, en el mejor de los casos, desproporcionada a la inversión realizada.

Un caso particular de este procedimiento constructivo es el revoco o enfoscado de tabiques y muros con mortero o yeso, que, en general, resulta beneficioso acústicamente. (Pueden lograrse aumentos en las TL de hasta 10 db).

Lo que sí resulta conveniente es el caso inverso, es decir, el enfoscado de las dos caras de un tabique poroso o ligero. En todo caso, las capas de enlucido deben estar íntimamente unidas al tabique.

Un caso representativo extremo es el representado en la figura 12, que corresponde a las TL de un muro de bloques porosos relativamente grueso (25 cm de espesor). A causa de la alta porosidad del material (ver [20]), el aislamiento del muro, a pesar de su peso bastante alto (235 kp/m²) es muy mediocre, como puede apreciarse por la curva número 1.

Basta colocar un enlucido bien hecho por ambas caras del muro para que el aislamiento suba espectacularmente, tal como representa la gráfica número 2. El aumento de peso es muy pequeño —ahora llega a 290 kp/m²—, a pesar de lo cual las TL han pasado de 14 a 47 db (14). Esto supone casi ¡2.000 veces más aislamiento!

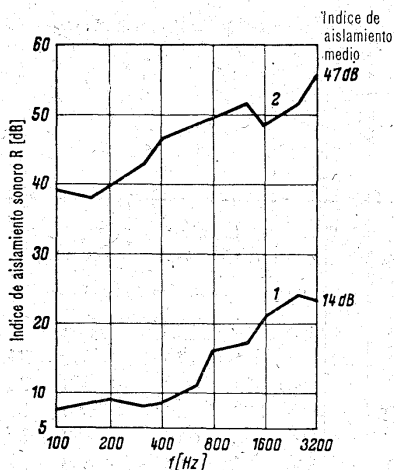


Fig. 12. Aislamiento de un muro poroso: (1), sin enlucir; (2), enlucido por ambas caras.

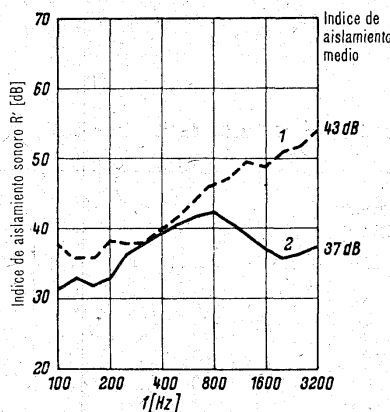


Fig. 13. Disminución del aislamiento de un muro de hormigón por aplicación de material poroso: (1), hormigón; (2), hormigón con placas de viruta de madera.

Resulta evidente que el cierre de los poros del tabique principal ha convertido a éste en un panel aislante al cual puede aplicarse la ley de masa.

Otro caso curioso es el mencionado en (15), que muestra cómo la aplicación de placas porosas a un panel rígido puede resultar desfavorable.

En muchos paramentos de hormigón normal se colocan, antes del enlucido, capas aislantes de viruta de madera, espumas rígidas o similares, con objeto de mejorar el aislamiento térmico.

Este sistema constructivo hace que el enlucido final ya no quede fuertemente unido a la pared maestra de hormigón. Pueden aparecer entonces fenómenos de resonancia que, en determinadas zonas del espectro de frecuencias, perjudican al aislamiento acústico. Esto, por otra parte, puede desprenderse de lo estudiado en los apartados I.4 y I.5.

Las gráficas de la figura 13, tomadas de (15), son bastante explícitas. La curva número 1 corresponde a un muro de hormigón de 7,5 cm de espesor y un peso de 260 kp/m², con doble enfoscado de 3 cm de espesor.

La curva número 2 corresponde al mismo muro provisto de placas de viruta de madera-cemento, de 2,5 cm de espesor y un enlucido final: el peso total es casi el mismo que en la curva número 1, y sin embargo, para determinadas frecuencias, las TL son bastante menores, haciendo que el aislamiento medio (\overline{TL}) baje de 43 a 37 db.

Es un caso claro de aplicación indebida de materiales ligeros o porosos que nos muestra cómo el uso indiscriminado de este tipo de sustancias puede tener como consecuencia un efecto de signo contrario al buscado, aparte del gasto extra que supone al constructor.

IV. Los dobles tabiques

La ley de masa (fig. 3) muestra que, para muros de aislamiento importante (≈ 50 db), hay que alcanzar, en la práctica, los 500 kp/m², lo cual está muy lejos de las prácticas constructivas actuales.

No tiene, pues, nada de particular que los expertos en acústica hayan tratado de buscar otras soluciones más acordes con la construcción ligera de hoy en día. Apareció así el doble tabique o «muro con cámara de aire», que nos es tan familiar.

IV.1. Relaciones teóricas

El comportamiento acústico de dos paneles de masas superficiales M_1 y M_2 , colocados a una distancia d (medida entre las caras internas, las más próximas), depende de las masas (o pesos), de la distancia d y, por supuesto, del ángulo de incidencia Φ .

Haciendo algunas suposiciones simplificadoras y por un razonamiento similar al empleado en I.2, es fácil deducir una expresión para el aislamiento del doble tabique (4).

En el caso en que los dos paneles sean iguales ($M_1 = M_2 = M$) y que el ángulo $\Phi = 0^\circ$ (incidencia normal), la fórmula siguiente,

$$TL = 20 \log \left[\left(1 + \frac{j \omega M}{(\rho c)} \right) \cos K d + j \left(1 + \frac{j \omega M}{(\rho c)} - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega M}{(\rho c)} \right)^2 \sin K d \right) \right], \quad [24]$$

en la que los símbolos tienen el significado ya conocido y K es el número de ondas en el espacio inter-panel,

$$K = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

sirve para calcular el aislamiento.

A frecuencias muy bajas se puede suponer que $\cos K d \approx 1$; $\sin K d \approx 0$, y entonces la [24] queda:

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{\omega^2 M}{(\rho c)^2} \right), \quad \text{en db}, \quad [25]$$

cuya semejanza con la [6] es innegable.

A frecuencias bajas en las que $\sin K d \approx K d$, la fórmula es:

$$TL = 20 \log \left\{ 1 - \frac{\omega M K d}{(\rho c)} + j \left[\frac{\omega M}{(\rho c)} - \frac{1}{2} K d \left(\frac{\omega M}{(\rho c)} \right)^2 \right] \right\}. \quad [26]$$

Si en la [26] igualamos a cero la parte imaginaria, es decir,

$$\frac{\omega M}{(\rho c)} - \frac{1}{2} K d \left(\frac{\omega M}{(\rho c)} \right)^2 = 0,$$

teniendo en cuenta el valor de $K = \frac{\omega}{c}$, llegamos a:

$$f_0 = \frac{(\rho c)}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\rho d M}} \quad [27]$$

Esto quiere decir que para un cierto valor de la frecuencia, f_0 , dado por la [27], el espacio de aire entre ambos paneles actúa como un muelle entre las dos paredes de masas M , y el aislamiento, para dicha frecuencia, es teóricamente nulo (frecuencia de resonancia).

Cuando la frecuencia (ω) se hace tan alta que $\cos Kd$ es muy diferente de la unidad, debe utilizarse siempre la fórmula completa [24].

Si las dos paredes son disimétricas, la [27] viene cambiada a:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{d}} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}, \quad [28]$$

en la que M_1 y M_2 son los pesos en kp/m^2 de los dos paneles, y d , como siempre, su separación en cm.

Si se calcula previamente la frecuencia de resonancia para un determinado doble panel, por la [27], la [29] puede resultar más conveniente que la [24]:

$$TL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{2\pi f M}{(\rho c)} \right)^2 \cos^2 \Phi \left(\cos \beta - \frac{\pi f M}{(\rho c)} \cos \Phi \sin \beta \right)^2 \right], \quad [29]$$

en la que

$$\beta = \frac{(\rho c)}{\pi} \frac{f M}{f_0^2} \cos \Phi.$$

Las curvas de la figura 14 muestran las TL teóricas de dos paneles completamente aislados uno de otro, en los cuales el valor

$$\frac{2\pi f M}{(\rho c)} = 10$$

y en las que puede apreciarse la influencia del ángulo de incidencia (de 0° a 80°) sobre el desplazamiento de la resonancia inter-panel [27], para cuya frecuencia el aislamiento es nulo. Lo mismo puede apreciarse en las curvas de la figura 9.

En la práctica no ocurre nunca que el aislamiento sea nulo, debido a las pérdidas de energía ocasionadas por las masas de los dos paneles y a la absorción del sonido en las caras y bordes de los elementos que tienden a amortiguar la onda sonora que viaja por el espacio de aire.

Las gráficas que se obtienen experimentalmente en el laboratorio se parecen más a la representada en la figura 15. En ella, los *ceros* de la figura 14 (TL nulas) son sustituidos por *mínimos* para distintas frecuencias de resonancia.

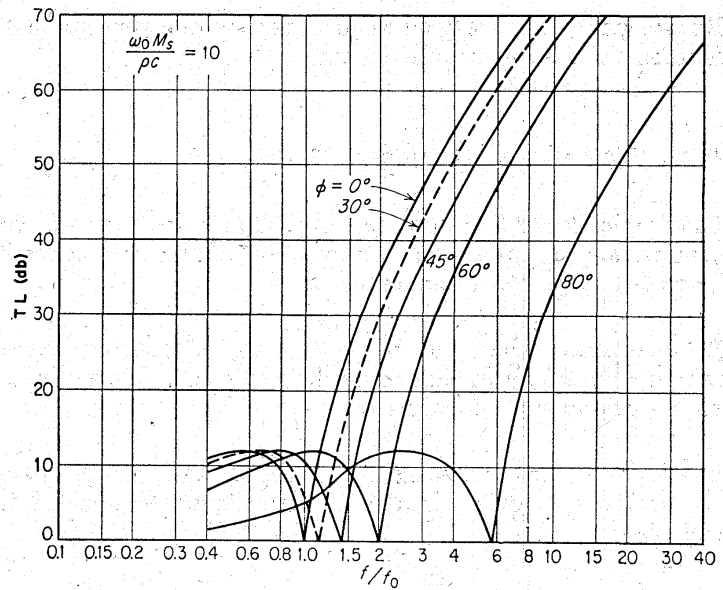


Fig. 14. TL teóricas de una doble pared.

La introducción de una manta absorbente en el espacio inter-panel tiende a hacer desaparecer estas resonancias (el aire no puede vibrar libremente), aumentando, por consiguiente, el aislamiento total de la doble pared.

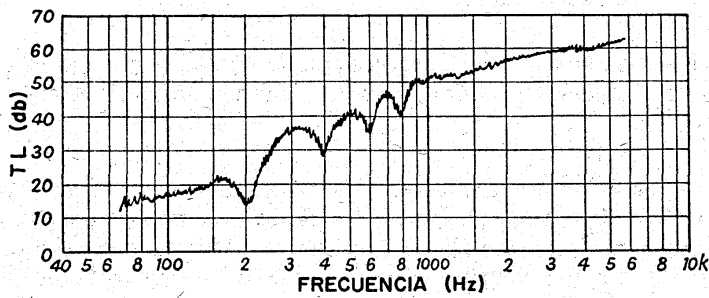


Fig. 15. Mínimos de resonancia en un doble panel.

Respecto a la distancia entre ambos paneles, la gráfica experimental del Chalmers Technical College, muestra el incremento en db en función del parámetro d de la [26] y de la [27]. La gráfica puede verse en la figura 16.

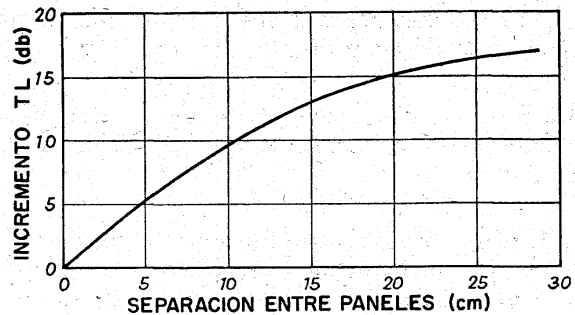


Fig. 16. Incremento en las TL en función de la distancia inter-panel.

En ordenadas se muestran los db que hay que sumar a las TL de los paneles (ley de masa) en función de la separación d en cm.

IV.2. Ejemplos constructivos

La complejidad del cálculo de las TL de un doble panel, con o sin relleno absorbente en la cámara de aire, es tal que resulta preferible hacer una medida experimental, como se describe en (6), págs. 113 y siguientes.

En el mismo trabajo (6), págs. 85 a 96, se incluyen una serie de ejemplos constructivos de tabiques, muros y forjados, con la técnica del doble panel, indicando sus TL , que pueden servir de orientación al constructor.

Lo mismo puede decirse de las curvas de la figura 11 [pág. 25 de (6)], que indican las pérdidas de transmisión (aislamiento) para algunos conjuntos constructivos, en función de la frecuencia.

V. El aislamiento y las normas

Se admite como hecho indiscutible que las viviendas actuales están insuficientemente aisladas contra los ruidos, aun cuando se las juzgue con unas especificaciones poco exigentes. Puede afirmarse que cuatro de cada cinco familias (es decir, un 80 %) están afectadas por los ruidos, debido al deficiente aislamiento de sus hogares.

Sin embargo, en lo que se refiere al aislamiento térmico, parece que la situación es algo más ventajosa, debido, probablemente, a la incidencia económica que se deriva del ahorro de energía para la calefacción (o refrigeración).

Según algunas encuestas, un 66 % de las familias afirma que las molestias principales provienen de las cajas de escalera. Un 58 % dice que son los ruidos de los vecinos (superiores e inferiores) los que más molestan, mientras que sólo un 28 % acusa a los vecinos contiguos (de la misma planta). Finalmente, un 39 % acusa los ruidos procedentes del exterior del edificio y un 15 % los que provienen de otros vecinos no contiguos.

En cualquier caso, puede afirmarse que existe una diferencia *categorica* entre las viviendas acústicamente tratadas y las normales.

Son muchas las causas de este evidente descuido en cuanto a exigencias acústicas. Probablemente —aparte de la cuestión económica, que no es la más importante—, la mentalidad del proyectista-constructor es el factor preponderante. Puede decirse que, desde el punto de vista acústico, existe un profundo abismo entre el laboratorio y la obra.

Para subsanar esta situación, algunos países han redactado normas —casi nunca de carácter obligatorio— que tienden a fijar, en forma de cifras, lo que debe exigirse para un «confort acústico».

En España, estas recomendaciones están contenidas en las Normas Acústicas (7) del año 1961 y, más recientemente, en forma muy incipiente y elemental, en la Ordenanza Municipal de Madrid (16).

V.1. Comentarios sobre las normas

Examinando algunas normas alemanas, holandesas, francesas e inglesas, vemos que el aislamiento preconizado se basa en el obtenido por un muro macizo de 400 kp/m². Es más, algunas normas (Francia) dicen taxativamente que un muro, tabique o forjado que pese 400 kp/m², o más, está *exento de ensayos acústicos*. Es bueno por definición.

Estos 400 kp/m² vienen a equivaler a unas *TL* medias de 50 db (ver fig. 3). A pesar de ello se han formulado quejas en el sentido de considerar insuficientes estos 400 kp, y así, el Research Institute for Public Health Engineering opina que es preciso llegar a muros de 600 kp/m² para lograr un aislamiento adecuado de paredes y forjados.

Las normas españolas no fijan este detalle constructivo —exagerado, a nuestro parecer—, sino que marcan los niveles máximos de ruido que pueden (o deben) existir en un recinto: dormitorios, salas, etc. [ver (7), pág. 16].

No hay que olvidar, en efecto, que el nivel sonoro en un recinto es función, principalmente, de dos variables: el nivel de la fuente productora y el grado de aislamiento que afecte a dicho recinto.

Sería absurdo, por ejemplo, obligar a construir muros y forjados de 600 kp/m² en una casa edificada en un barrio residencial de bajo nivel sonoro.

En el mismo sentido se pronuncia la Ordenanza Municipal de Madrid (16) en su artículo 10 del título II, que fija en 30 db el nivel máximo admisible en el interior de una vivienda.

La norma francesa es algo más explícita y exige, como aislamientos mínimos para ruidos transmitidos por el aire, los indicados en la tabla VI:

TABLA VI. Aislamiento de viviendas

FRECUENCIAS		Graves	Medios	Agudos
Tabiques entre viviendas		36	48	54
Muros exteriores	Calle ruidosa	25	30	40
	Calle tranquila	15	20	25

Las indicaciones de frecuencia de graves, medios y agudos corresponden, respectivamente, a los campos, 100-320, 400-1.250 y 1.600-3.200 Hz. Para lograr los aislamientos indicados en la tabla VI, la norma francesa recomienda muros de hormigón normal de 15 cm de espesor (47 db) o de ladrillo macizo de 11 cm con doble revoque de 15 mm (46 db). Todo ello en fachadas que den a calles ruidosas.

Para las paredes medianeras entre viviendas indica dos soluciones:

- a) Muros pesados de 350 kp/m² (mínimo).
- b) Dobles tabiques, uno de los cuales debe pesar 150 kp/m² (mínimo), con un espesor de

10 cm. El otro tabique puede ser más ligero, pero la separación entre ambos debe ser de 5 cm (mínimo). Entre los dos se colocará una manta de lana mineral.

En cuanto a forjados, admite como suficientes los de 350 kp/m² o más, cualquiera que sea el revestimiento o solado.

Se admiten forjados más ligeros (220 kp/m²) siempre que se monte un parquet flotante sobre una manta de lana mineral, a condición de que se evite toda unión rígida entre el forjado y el parquet.

V.2. El «índice de protección del sonido»

La norma alemana DIN 4 109 enuncia, con mucho detalle, el «índice de protección del sonido», LSM, cuya finalidad veremos a continuación. Tal como se indicó en I.1, es muy corriente en acústica manejar el dato de las \overline{TL} medias, con lo cual se sustituye la curva de aislamiento (en función de la frecuencia), por un simple número en db.

Pero este valor medio no permite estudiar el verdadero comportamiento de una disposición aislante frente a un determinado espectro de frecuencias. Para subsanar esto sin abandonar la ventaja de caracterizar por un «número» a un panel determinado, la DIN 4 109 muestra un método de cálculo basado en la experiencia (17).

El sistema es muy sencillo: las curvas de la figura 17 sirven de base para el cálculo del LSM. La gráfica 1 (superior) corresponde a las TL (aislamiento) en función de la frecuencia para paredes y suelos medidos en el laboratorio. La curva 2 se refiere a las condiciones normales de construcción (ver V.3). Los números sobre las curvas indican db.

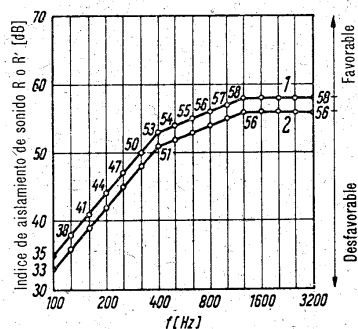


Fig. 17. Curva teórica para el LSM: (1), curva para laboratorio; (2), condiciones normales de construcción.

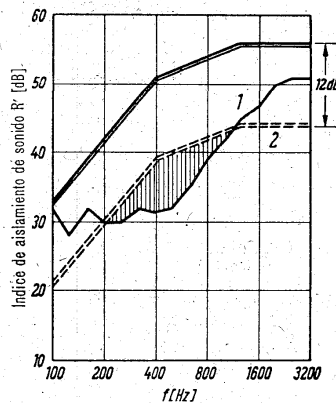


Fig. 18. TL de una pared de Ytong: (1), curva del Ytong; (2), desplazamiento en -12 db de la curva teórica.

Se supone que estas curvas (que podemos considerar una sola) representan el aislamiento «suficiente» para paredes y suelos, por lo que aparecen en el ábaco las dos regiones favorable \leftrightarrow desfavorable, cuyo sentido es obvio: todo material cuya curva coincida o se sitúe por encima de la teórica, es adecuado.

Cuando no ocurre así, se desplaza verticalmente la gráfica hasta que entre la curva real y la teórica no se produzca una desviación superior a los 2 db (en promedio). El desplazamiento de la curva teórica, en db, es el LSM.

El ejemplo de la figura 18 aclarará mejor esto: la curva 1 (llena) corresponde al aislamiento de un tabique de Ytong de 100 kp/m² con doble enlucido. La curva superior (gruesa) es la teórica de la figura 17.

La gráfica 2 (doble de trazos) es la teórica desplazada hasta coincidir con la del Ytong. La zona rayada es lo que le falta a la del Ytong para cumplir la teórica. Los puntos de la curva práctica que caen por encima de la teórica desplazada hay que suponerlos como si estuvieran en ésta. La parte rayada representa, pues, los 2 db (valor promedio) que se admiten como desviación.

En ordenadas (derecha) se ve que fue preciso bajar la teórica 12 db para hacerla coincidir con la del material (Ytong). Luego, el LSM de éste es de -12 db.

Otra forma de enfocar esta cuestión es con la ley de masa. La curva de la figura 3 muestra las TL en función del peso de un panel. La de la figura 19 es otra forma de esta ley en función del LSM.

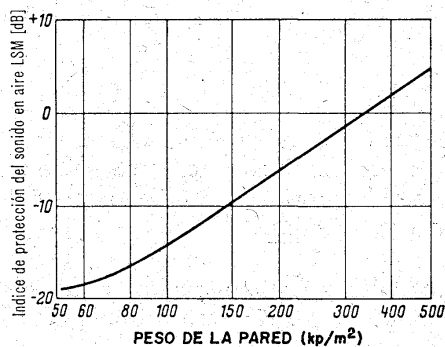


Fig. 19. LSM en función del peso de una pared.

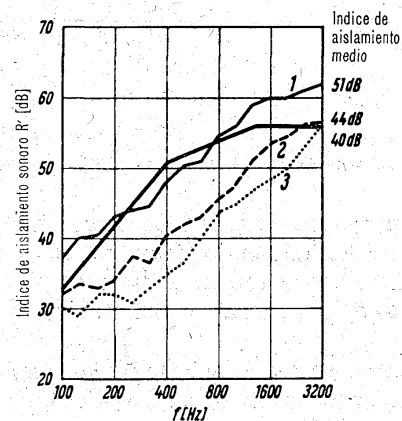


Fig. 20. TL en función de la frecuencia: (1), ladrillo macizo; (2), ladrillo macizo de 1/2 pie; (3), hormigón poroso.

Puede verse que todos los tabiques (o forjados) que pesen 350 kp/m² (LSM = 0) serán aptos para el aislamiento. Los más pesados darán un índice de protección positivo (LSM > 0), mientras que los más ligeros tendrán un LSM negativo.

Así, un tabique de 150 kp/m² (LSM = -10) poseerá un aislamiento inferior en 10 db a lo admisible por la Norma.

El procedimiento es algo rebuscado; pero puede servir para cálculos y tanteos rápidos, a nivel de estudio de arquitectura.

Como ejemplo, vemos en la figura 20 la curva-patrón de la figura 17 superpuesta a tres curvas experimentales: 1. Pared de ladrillo macizo de 1 pie, de 475 kp/m², LSM = +3 db.

2. Muro de ladrillo macizo de 1/2 pie, 240 kp/m², LSM = -5 db. 3. Tabique de bloques de hormigón poroso, de 11,5 cm de espesor, 130 kp/m², LSM = -9 db.

Vemos, finalmente, el elevado LSM que presenta un muro medianero formado por una pared de ladrillo hueco, de 24 cm de espesor, cámara de aire de 6 cm parcialmente llena con una manta absorbente de 2,5 cm, otra pared de ladrillo hueco de 11,5 cm y sendos enlucidos por ambas caras externas. El conjunto posee un elevado LSM > 15 db y unas \overline{TL} de 67 db (figura 21). El peso total es de 550 kp/m².

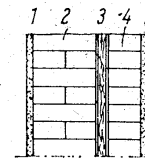
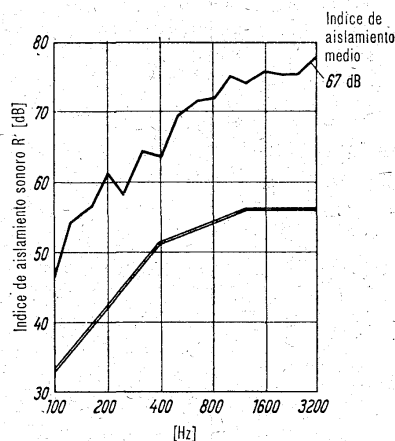


Fig. 21. Aislamiento en función de la frecuencia: (1), enlucido; (2), ladrillo hueco de 24 cm; (3), placas ligeras de viruta de madera; (4), ladrillo hueco de 11,5 cm.

V.3. Transmisión indirecta o colateral

Fueron probablemente las normas francesas las primeras en tener en cuenta la transmisión colateral, entendiéndose como tal los pasos de sonido por caminos diferentes del tabique separador. Estos caminos indirectos pueden reducir notablemente el aislamiento previsto, cuya falta no debe achacarse entonces a defectos del muro en cuestión.

El efecto se hace muy patente si comparamos el aislamiento frente a ruidos transmitidos por el aire, en un tabique y en un forjado. Así, un suelo de 450 kp/m² posee el mismo aislamiento que un tabique o muro de 600 kp/m².

Esto quiere decir que las transmisiones colaterales tienen mayor importancia en cerramientos verticales que en los horizontales. Aparte de los huecos (puertas y ventanas), este efecto depende mucho de la disposición de los tabiques, forma de unirlos a los forjados y muros de fachada, rodapiés y otros detalles que, en el caso de forjados, no tienen razón de ser.

Otras veces, y esto sí que es achacable al propio tabique, el descenso de las TL sobre lo previsto en el proyecto acústico se debe, cuando se trata de dobles paneles, a la presencia de uniones rígidas entre ambos elementos del doble tabique, muy difíciles de evitar durante el proceso constructivo.

VI. Recomendaciones generales

Las líneas que anteceden han tenido como finalidad hacer resaltar la importancia de poseer conceptos claros a la hora de enfrentarse con un problema acústico concreto: el aislamiento sonoro.

Como hemos visto, no se tocan aquí puntos de gran interés, como son el acondicionamiento acústico, la geometría de los locales, los ruidos producidos por instalaciones domésticas y su forma de combatirlos, la mayoría de los cuales se tratan detalladamente en la literatura (ver bibliografía).

En todo caso, entendemos que el *aislamiento* es el problema número uno y, sobre todo, el que debe abordarse en el momento mismo de comenzar el proyecto del edificio, pues las correcciones «a posteriori» son muy difíciles, por no decir imposibles.

Al Departamento de Metrología es frecuente que acudan colegas cuyo problema consiste en que unos cerramientos o forjados resultan insuficientes, una vez terminado el edificio, para lograr un aislamiento acústico mínimo.

La coexistencia de instalaciones industriales: salas de fiestas, cafeterías, discotecas, aparatos de acondicionamiento de aire, máquinas propias de un edificio de viviendas y otras, con los pisos o apartamentos habitados, agrava aún más el problema planteado por un aislamiento acústico precario.

Y no digamos nada de los ruidos exteriores, principalmente de tráfico, que cada vez más han de obligar al arquitecto a un tratamiento especial de los muros de fachada.

Todo ello complicado con la aparición de Normas y Ordenanzas, como la señalada en (16), que, al propio tiempo que tratan de poner orden en el caos actual del ruido, ponen en manos del usuario un arma de efectos legales que, necesariamente, ha de volverse contra el proyectista, el constructor o, en definitiva, contra el vendedor o arrendador de la vivienda.

En la mayoría de los casos estas reclamaciones están justificadas y, lo que es peor, cualquier operación de corrección tendente a mejorar el aislamiento resulta enormemente molesta y, por supuesto, de coste elevadísimo.

Quisiéramos, en una especie de decálogo, prevenir a los interesados sobre una serie de falsos conceptos y ayudarles a la consecución de ideas claras al enfrentarse con un proyecto en el cual la acústica —por las razones que sean— debe estar presente:

- 1) Los materiales masivos y densos —hormigón, ladrillo macizo— son buenos aislantes para el sonido (fig. 3). Los materiales porosos no sirven como aislantes.
- 2) Un enlucido bien hecho sobre un tabique puede incrementar el aislamiento en 4-5 db. Con un doble enlucido (ambas caras), esta mejora puede alcanzar casi los 10 db (figura 12).
- 3) El hormigón poroso, por sí solo, no debe ser tenido en cuenta como aislante (III.2).
- 4) Muchas espumas —rígidas o blandas—, tanto en forma de mantas como aplicadas in situ, aportan mejoras en el aislamiento tan insignificantes que, en general, no compensan su coste (fig. 11).
- 5) Cuando se proyecte un doble tabique debe pensarse en que la distancia entre los dos paneles no sea pequeña. La resonancia de la doble pared ([27] y [28]) debe ser lo más baja posible ($f < 80$ Hz) para que el mínimo de TL (fig. 14) caiga en una zona de frecuencias muy bajas.
- 6) No debe haber puntos de unión —sobre todo rígidos— entre ambos paneles, y la cámara de aire debe rellenarse parcialmente con un material absorbente (IV.1) para evitar que el aire de la cámara vibre.

- 7) Si es posible, los dos elementos que forman el doble tabique deben ser diferentes: hormigón-ladrillo, ladrillo hueco-ladrillo macizo, doble hueco-hueco sencillo, etc., para evitar efectos de coincidencia (I.4, fig. 6).
- 8) La porosidad (accesible), fisuras, grietas y orificios en los cerramientos, son nefastos para el aislamiento. Pueden anular totalmente cualquier cálculo.
- 9) Cuando se proyecte un forjado aislante, no suele ser suficiente el simple dato del peso en kp/m^2 . En muchos forjados aligerados el reparto de masa no es uniforme y, en las zonas huecas abovedadas, se presentarán puntos de «mínima resistencia», baja impedancia [9], por los cuales puede pasar el sonido.
- 10) Las disposiciones aislantes complejas: placa rígida-recubrimiento flexible; sandwich de dos elementos rígidos con un elemento blando en medio; dobles paneles no tradicionales; suelos flotantes; falsos techos; puertas y ventanas aislantes, etc., deben tratarse con especial cuidado y, en caso de duda, ser sometidas a un ensayo de laboratorio (6).

VII. Bibliografía

- (1) HARRIS, C. M.: *Handbook of noise control*. McGraw-Hill, 1957.
- (2) KURTZE, G.: *Física y técnica de la lucha contra el ruido*. Ediciones Urmo, Bilbao, 1969.
- (3) BERANEK, L. L.: *Noise reduction*. McGraw-Hill, 1960.
- (4) BRUEL, P. V.: *Sound insulation*. Chapman & Hall, 1951.
- (5) TOBÍO, J. M.: «Los ruidos en las edificaciones». *Informes de la Construcción*, núms. 105, 106, 109, 113, 119, 1958-59.
- (6) TOBÍO, J. M.: *El aislamiento y acondicionamiento acústicos en la edificación*. Inst. Eduardo Torroja, 1968.
- (7) *Normas acústicas en la edificación*. Inst. Eduardo Torroja, 1961.
- (8) MORSE, P. M.: *Vibration and Sound*. New York, 1936.
- (9) FESHBACH, H.: *Wado Techn. Rép.*, 52-204, vol. I, 1955.
- (10) TOBÍO, J. M.: *Ensayos no destructivos*. Inst. Eduardo Torroja, 1967.
- (11) FURRER, W.: *Schweiz. Bauz.*, 72, 458, 1954.
- (12) WATTERS, B. G.: *J. Acoust. Soc. Amer.*, 898, julio 1959.
- (13) BRUEL, P. V.: *Techn. Rev.*, núm. 1, enero 1955.
- (14) KRISTEN, Th.: *Bauwesen*, serie D, fasc. 2, Stuttgart, 1952.
- (15) GOSELE, K.: *Gesundheits-Ingenieur*, 82, 333, 1961.
- (16) «Ordenanza municipal de protección del medio ambiente contra la emisión de ruidos y vibraciones». *B. O. de la Provincia*, Madrid, 26 julio 1969.
- (17) CREMER, L.: *Schallschutz von Bauteilen*, Berlín, 1960.
- (18) PÉREZ MIÑANA, J.: *Compendio práctico de acústica*. Editorial Labor, Barcelona, 1969.
- (19) MORSE, P. M., e INGARD, K. U.: *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, 1968.

Isolation acoustique

J. M. Tobío, Département de Métrologie de l'IETcc

Il s'agit d'une matière très concrète de l'acoustique du bâtiment, l'isolation. L'auteur met l'accent sur les fondements théoriques du phénomène et établit les formules les plus simples qui permettent de calculer aisément les pertes de transmission d'un matériau ou d'un ensemble d'éléments constructifs isolants.

Cet article comporte plusieurs graphiques et abaques permettant d'aborder, sans aucune formule mathématique, le problème pratique de l'isolation tout en utilisant les matériaux communs, et sans occasionner des frais susceptibles d'augmenter substantiellement le coût du projet.

Finalement, l'auteur fait une étude critique des normes et l'influence qu'elles exercent sur les problèmes de l'isolation des logements et fournit des données concernant la nouvelle Ordonnance de la Municipalité madrilène.

Accoustical insulation

J. M. Tobío, Dept. of Metrology of IETcc

This is a very specific subject in the field of architectural acoustics, namely, insulation. Emphasis is placed on the theoretical foundations of this phenomenon, and the most simple formula are developed to calculate easily the transmission losses of a material or the constructional insulating arrangements.

The practical aspect of insulation can be considered by means of several graphs and charts, without the use of mathematics, and utilising common materials, that will not substantially increase the cost of the project.

Finally this papers offers a critical discussion of building codes, and their reference to the accoustical insulation of dwellings, and data is included on the new regulations of the Madrid Municipality.

Schallisolierung

J. M. Tobía, Abteilung für Metrologie im IETcc

Es handelt sich hierbei um ein ganz konkretes Thema der architektonischen Akustik, nämlich die Isolierung; besondere Berücksichtigung finden die theoretischen Grundlagen des Phänomens, und es werden die einfachsten Formeln aufgestellt, die es ermöglichen, rasch den Übertragungsverlust eines Materials oder die bauliche Anordnung mit schalldämpfendem Effekt.

Dank verschiedener Abbildungen und Rechentabellen ist es möglich, ohne mathematische Berechnungen, das praktische Problem der Schalldämpfung in Angriff zu nehmen unter Ausnutzung der geläufigen Materialien und ohne dass Kosten entstehen, die das Projekt finanziell belasten.

Abschliessend wird eine kritische Besprechung der Normen und ihres Einflusses auf die Probleme der Schalldämpfung im Wohnungsbau gegeben, einschliesslich der Daten aus der neuen Verordnung der Madrider Stadtverwaltung.