

REHABILITACION ACUSTICA DE EDIFICIOS *

A. Moreno

Instituto de Acústica del CSIC. Serrano 144, Madrid 28006

1. Introducción

Ante la proposición de ANDIMA, de que hablase de un tema de Acústica, que pudiera ser de interés generalizado pensé que la rehabilitación acústica de edificios contenía los requisitos imprescindibles.

En efecto su casuística incluye tan amplio abanico de situaciones que permite considerar la mayor parte de los aspectos generales del proceso de aislamiento acústico a la par que da pie a incluir el estado de desarrollo e investigación punteros en este momento y que pueden ser de interés a un colectivo como el que engloba ANDIMA con interés por incorporar en su actividad las tecnologías y procedimientos más avanzados.

Toda rehabilitación incluye casi inexorablemente un suplemento del aislamiento bien a ruido aéreo, estructural o a impactos, de los divisorios existentes. Al comportamiento de capas suplementarias y la mejora de las partes débiles en divisorios dedicaré la mayor parte de esta charla.

Rehabilitar es modernizar y también nos encontramos con la necesidad de considerar las instalaciones generales usuales en edificios para conseguir las condiciones imprescindibles en la vida y actividad moderna.

Readaptar espacios a necesidades actuales es sin duda otro gran tema que nos introduce en pantallas y divisorios parciales y en acondicionamiento interior.

Los objetivos a conseguir se valoran conforme a criterios que implican magnitudes objetivas y algoritmos de ponderación que incluyen efectos subjetivos.

Qué acciones tomar para conseguir los objetivos requiere un diagnóstico adecuado de la situación concreta: identificación y valoración

de fuentes de ruido, valoración de caminos de propagación, difusión y reverberación etc. Esto requiere una instrumentación adecuada.

Intentaré por tanto un equilibrio entre la amplitud de aspectos y la profundidad de los mismos siempre con el prisma de utilidad práctica que me parece esencial. El tiempo, al ser limitado, impone por tanto una selección de los temas que intentaré cumpla los objetivos básicos indicados.

2. Índices y criterios de valoración de ruidos y vibraciones

Esta problemática atrae la atención de los gobiernos y autoridades locales de los distintos países a partir de los años cincuenta, y comienzan a producir legislaciones sobre ella. En esta tarea participan activamente las asociaciones y organizaciones de profesionales, fabricantes, instituciones de metrología, etc. En EEUU. la lista se haría interminable.

La protección del individuo frente a ruidos y vibraciones requiere **métodos que proporcionen índices globales** (número único) de valoración de ambientes acústicos de ruidos o de vibraciones. Son en general bastante complejos y aplican una adecuada ponderación en las distintas bandas de frecuencia.

Los criterios de ruido y vibraciones establecen especificaciones sobre límites a respetar o exigencias a cumplir en base a los índices globales y que tienen como referencia a un individuo promedio lo cual significa pueden encontrarse individuos cuya reacción al ruido es más

* Conferencia pronunciada en la II Convención de Empresas de sector de los Aislamientos Térmicos y Acústicos, Octubre 1989

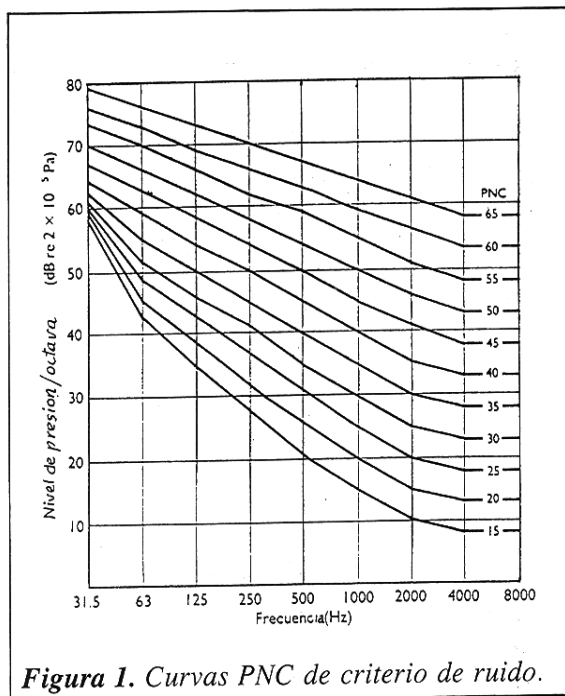


Figura 1. Curvas PNC de criterio de ruido.

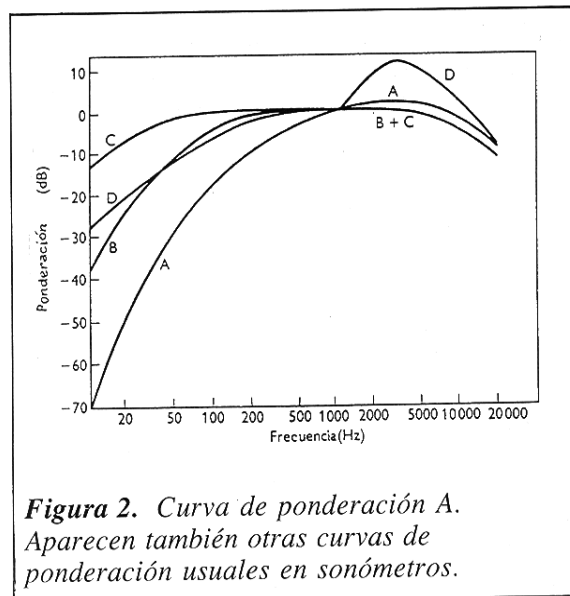


Figura 2. Curva de ponderación A. Aparecen también otras curvas de ponderación usuales en sonómetros.

aguda y otros que por el contrario son más tolerantes dependiendo de múltiples factores.

Todos los índices proceden ponderando magnitudes acústicas objetivas tales como la presión, la intensidad o la aceleración (en vibraciones). La **presión sonora** es de naturaleza igual a la presión en Física pero su carácter distintivo lo constituyen las variaciones en torno a la presión atmosférica con un frecuencia suficiente para ser destacadas por el oído humano. Cubren el rango teórico 20 Hz a 20 KHz. Por debajo son infrasonidos y por encima ultrasonidos.

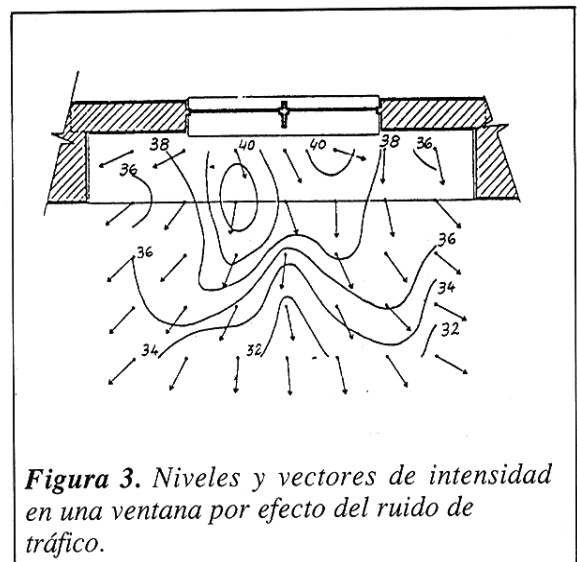


Figura 3. Niveles y vectores de intensidad en una ventana por efecto del ruido de tráfico.

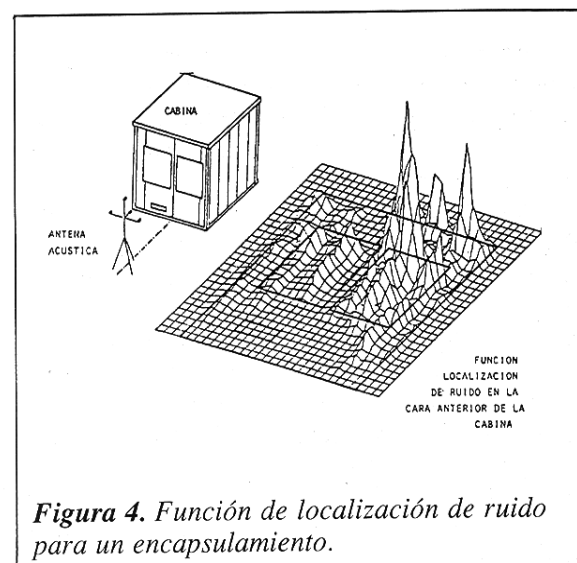


Figura 4. Función de localización de ruido para un encapsulamiento.

Curvas de criterio de ruido (en anglosajón curvas NC). En su definición se ha pretendido un confort satisfactorio para la comprensión de la palabra, la audición de música, de la radio y de la televisión en espacios cerrados. Son curvas límite a no sobrepasar por el espectro de ruidos interiores, diseñadas para controlar el ruido interior a edificaciones. Aparecen en la Figura 1. Son la variante americana de las curvas NR de la normativa ISO.

Curvas de criterio de ruido en habitaciones y salas (en anglosajón curvas RC). Son semejantes a las anteriores pero específicas del ruido interior producido por instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Fueron obtenidas empíricamente por Blazier en 1981 y utilizadas en los documentos

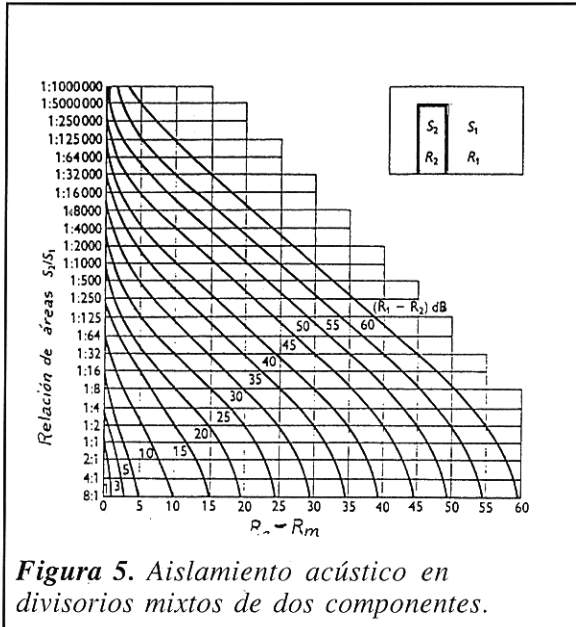


Figura 5. Aislamiento acústico en divisorios mixtos de dos componentes.

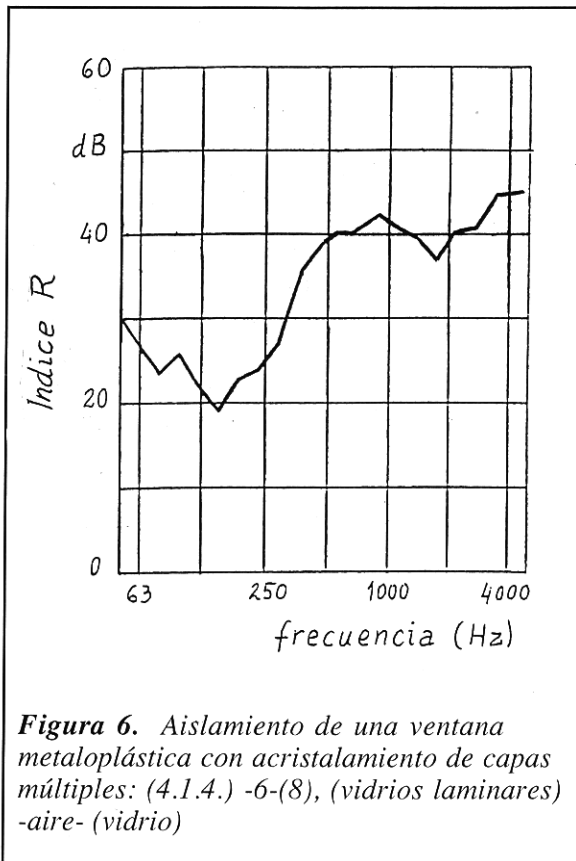


Figura 6. Aislamiento de una ventana metaloplástica con acristalamiento de capas múltiples: (4.1.4.) -6-(8), (vidrios laminares) -aire- (vidrio)

de ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).

Nivel de ruido en decibelios A.

El valor de un ruido que este índice le asocia resulta de filtrar la señal con el circuito eléctrico de ponderación que aproxima con suficiente precisión la curva A. Ver Figura 2. Corres-

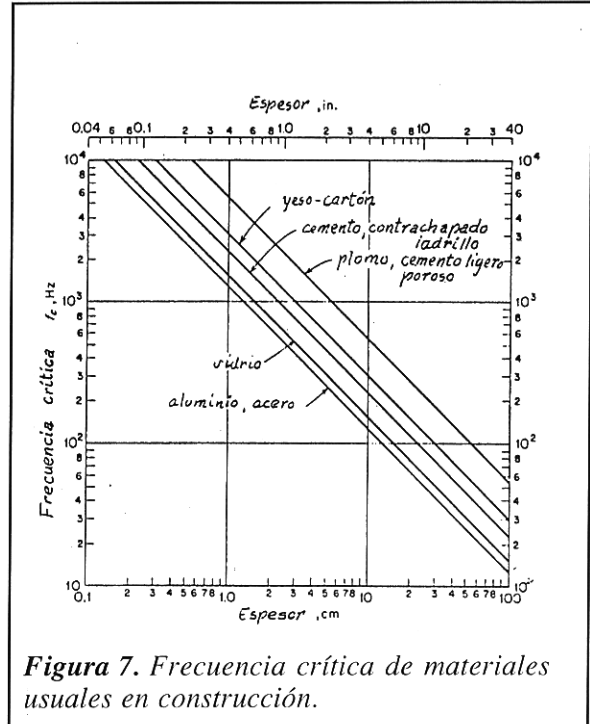


Figura 7. Frecuencia crítica de materiales usuales en construcción.

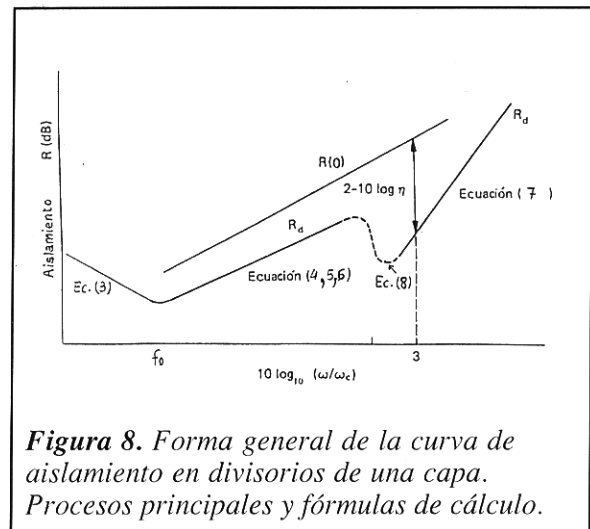


Figura 8. Forma general de la curva de aislamiento en divisorios de una capa. Procesos principales y fórmulas de cálculo.

ponde a la lectura suministrada por un sonómetro con el selector de filtro en la posición A. La unidad es el dB(A).

Nivel sonoro continuo equivalente.

Es el nivel de un ruido de nivel constante que contiene la misma energía que el considerado en un tiempo determinado. Usualmente se pondera en dB(A). Se fundamenta en la idea de un efecto acumulativo de la energía acústica en el tiempo en cierto modo semejante a los efectos de otros tipos de radiaciones (rayos X, radiactividad, etc.). Esta idea da lugar también al concepto de **dosis de ruido**.

En las normativas exigenciales se estable-

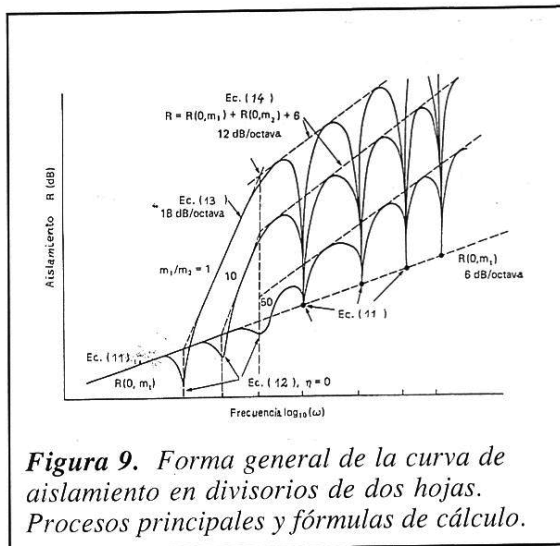


Figura 9. Forma general de la curva de aislamiento en divisorios de dos hojas. Procesos principales y fórmulas de cálculo.

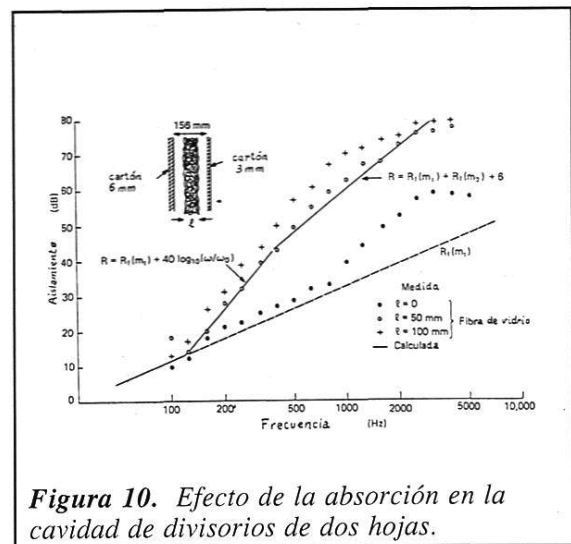


Figura 10. Efecto de la absorción en la cavidad de divisorios de dos hojas.

cen niveles a no sobre pasar. En la tabla que sigue se indican a título informativo los niveles de ruidos usuales en dB(A) y los índices NC correspondientes.

También se han desarrollado **índices globales para valorar el aislamiento** a ruido aéreo y a ruido de impactos.

3. Diagnóstico, metodología e instrumentación

La rehabilitación requiere como primer paso un buen diagnóstico de la situación acústica de cada caso concreto, para conocida la finalidad a conseguir poder determinar las acciones correctas más convenientes. Este diagnóstico abarca tres aspectos fundamentales:

- conocimiento de las características del ruido de inmisión
- identificación de las fuentes que lo producen y
- situación de los caminos de penetración y elementos de débil aislamiento.

La elección de las soluciones a aplicar resultará entonces más lógica y equilibrada. Veamos una panorámica de los métodos existentes para abordar estos diferentes aspectos.

3.1. Determinación de las características del ruido

Una primera característica física del ruido es su energía, ligada más o menos directamente a la sensación subjetiva de sonoridad. Una

valoración cuantitativa lo constituye su **nivel de presión sonora** y su evolución temporal. De esta representación es importante su carácter continuo y no muy particularmente si presenta picos acusados, o si es impulsivo. En el caso de los criterios establecidos mediante la curva de ponderación A, basta con usar instrumentos de medida que incluyan esta curva de ponderación.

Para las restantes valoraciones globales se necesita además conocer el reparto de esa energía en las distintas bandas de frecuencia, es decir **el espectro**. A partir de él, por aplicación de los algoritmos o procedimientos adecuados se obtienen los índices pertinentes en cada caso.

Cualquiera de las dos representaciones nivel/tiempo o nivel/frecuencia son equivalentes y están relacionadas a través de la transformación de Fourier.

$$(1) p(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt$$

Mediante la instrumentación digital, que utiliza la **transformada rápida de Fourier** (FFT en anglosajón), que ha experimentado unas mejoras de uso espectaculares estos últimos años, se puede pasar de una a otra representación de manera fácil y rápida en la mayoría de los casos.

En recintos de extensión considerable resulta muy útil conocer la distribución del ruido en base a líneas de igual valor de un índice global determinado formándose un mapa de ruido.

3.2. Identificación y localización de fuentes

El conocimiento de la forma temporal del ruido y/o su espectro basta en muchos casos para saber el tipo de fuente de ruido que lo produce y por ende los caminos de propagación más verosímiles. A estos fines resulta interesante disponer de un **catálogo de ruidos** y fuentes que los producen.

Otras veces, por el contrario, se hace necesaria una investigación directa de las fuentes de ruido, sus características y ubicación. Esta situación es particularmente importante en el caso de fuentes discretas y de dimensiones más bien reducidas. La **potencia** de la fuente y su **directividad** son entonces del máximo interés.

En esta determinación está alcanzando estos últimos años una importancia grande la **intensimetría acústica**. Su progreso se basa fundamentalmente en los avances de la FFT a nivel práctico ya mencionados. El procedimiento principal usa dos micrófonos idénticos situados muy próximos, el valor medio de las presiones se toma como valor de la presión y de su diferencia, mediante operaciones de tratamiento de señal, se infiere el valor de la velocidad acústica y finalmente la intensidad. En la Figura 3 se muestran los resultados para el ruido emitido hacia el interior por una ventana. En ambientes reverberantes requiere precauciones especiales y limita su utilidad al campo próximo.

En esta determinación de fuentes de ruido usada con un concepto más amplio, resulta tam-

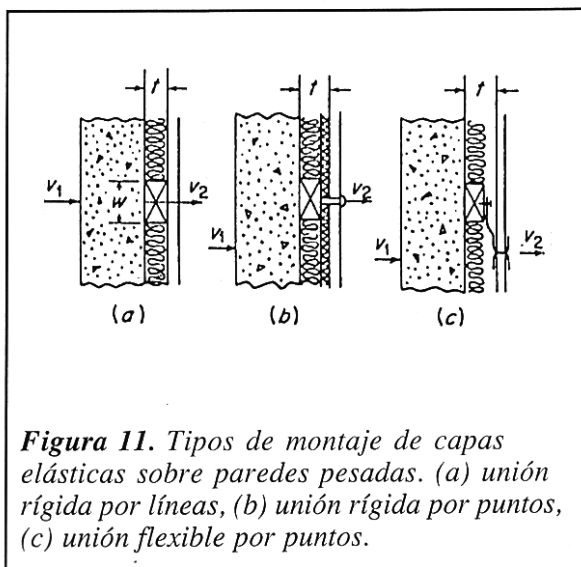


Figura 11. Tipos de montaje de capas elásticas sobre paredes pesadas. (a) unión rígida por líneas, (b) unión rígida por puntos, (c) unión flexible por puntos.

bién interesante la **función localización de ruido**, que mediante operaciones complejas de correlación y convolución, sobre las señales captadas mediante **antenas acústicas**, diseñadas ad hoc, pueden determinarse en áreas extensas las zonas que emiten (o que transmiten) más ruido. La Figura 4 ilustra en un encapsulamiento las zonas de la cara próxima que emiten más ruido al exterior, o dicho de otro modo en este caso las zonas de más débil aislamiento.

En la utilización de estas técnicas avanzadas resulta innecesario decir que se hace uso de tecnología digital y potentes ordenadores, gobernados por programas muy elaborados todavía hoy no comercializados en su mayoría. Se trabaja en la adaptación a ordenadores más pequeños tipo PC.

3.3. Caminos de penetración y elementos de débil aislamiento

En ocasiones hay que suplementar las exploraciones anteriores mediante un concienzudo estudio y determinación de las vías y caminos principales de penetración del ruido lo que nos indicará los elementos de menor aislamiento y por tanto las acciones de mejora a tomar.

En este sentido la experiencia permitirá detectar muchos caminos de penetración preferente de modo fácil y directo como puede ser el caso de ventanas en relación al ruido exterior, o el de conductos y tuberías en el ruido de instalaciones.

Otras veces no es posible hacer este diag-

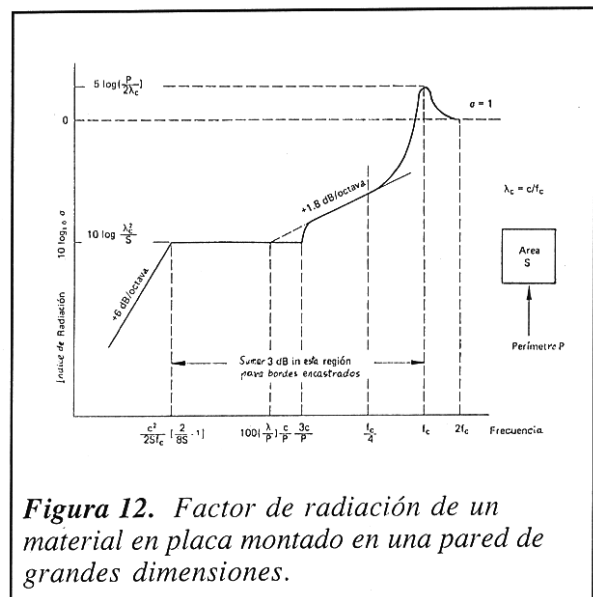
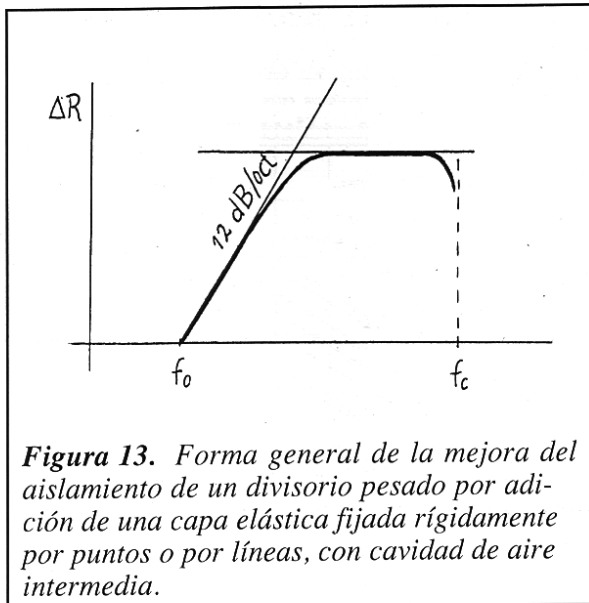


Figura 12. Factor de radiación de un material en placa montado en una pared de grandes dimensiones.



nóstico con el simple “buen oficio” y no hay más remedio que recurrir a técnicas más elaboradas, entre las que cabe destacar las derivadas de operaciones de **correlación** (soportada por funciones de coherencia) y de la **espectrometría de retraso temporal**. Ambas usan la idea intuitiva de valorar la señal que “pasa” por un punto o zona en cuanto causada por la fuente de ruido. De esta manera se “sigue” la propagación en sus trayectoria de mayor intensidad y por consiguiente se puede arbitrar el obstáculo a interponer.

4. Rehabilitación de fachadas

En edificios no singulares, carecen de o con pocas instalaciones generales, no es necesario generalmente una diagnosis exhaustiva y se pueden señalar claramente líneas generales de rehabilitación.

En fachadas se encuentra casi sin variación que las acciones de rehabilitación más contundentes hay que concentrarlas en las ventanas. La debilidad acústica de los vidrios, la deficiente estanquidad de la fijación a las hojas, la de éstas con el marco, la de éste con los muros y eventualmente las rendijas de las persianas (enrollables) constituyen los puntos de débil aislamiento acústico más acusados.

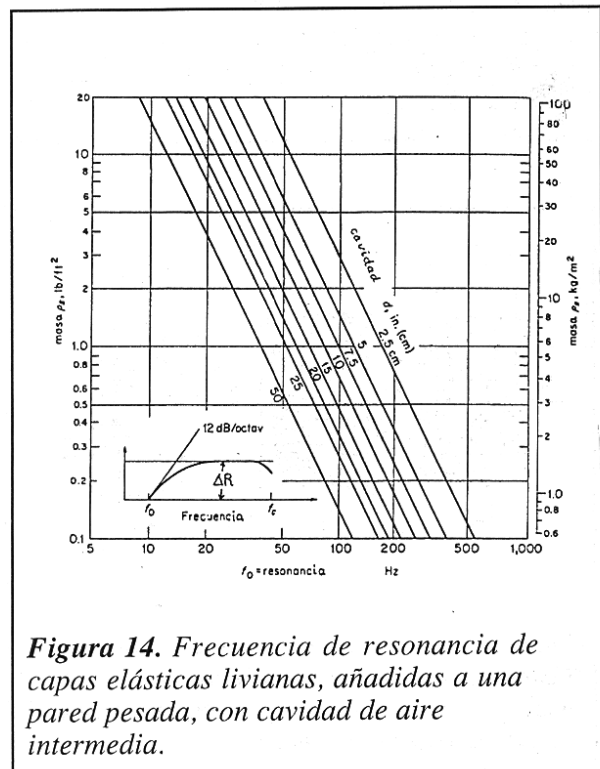
Resulta de gran utilidad para estos casos la fórmula del aislamiento acústico de **divisores mixtos**, que para dos componentes puede escribirse en la forma:

$$(2) R_m = -10 \lg \sum_i (S_i/S) 10^{-R_i/10}$$

Esta fórmula, para dos componentes, es

abordable con la mayoría de las calculadoras de bolsillo actuales si bien quizá resulte más didáctico usar el ábaco/gráfica de la Figura 5.

El aislamiento del divisorio mixto supera el aislamiento del elemento más débil en tanto más cuanto mayor es el aislamiento del elemento fuerte hasta un valor límite dado por $-10 \lg (S_v/S)$. Para relaciones de área entre 0.1 y 1, que cubren las situaciones habituales en la edificación, este valor varía de 10 dB a 0 dB. Es por tanto la ventana quien gobierna fundamentalmente el aislamiento conseguible. Pero es que el aislamiento de la ventana, a su vez resulta del combinado vidrio/marco con las rendijas perimetrales y es de nuevo el aislamiento de éstas, la parte más débil, quien decide el aislamiento. La actuación lógica escalonada sería: mejora de la estanquidad de los vidrios al marco de las hojas, mejora de la estanquidad de las hojas al marco y de éste con el muro. Incrementar el espesor de los vidrios, usar vidrios laminados, o acristalamientos múltiples y finalmente usar ventanas dobles permite conseguir aislamientos comparables con los del divisorio aislamientos comparables con los del divisorio ciego de fachada. En este sentido hay que señalar que el aislamiento aumenta con el espesor a razón de 4 dB/ octava y que para vidrios laminados se admiten 3 dB de mejora general. En la Figura 6 se muestra el aislamiento de una ventana con acristalamiento múltiple y carpinte-



ria metaloplástica en la que se han cuidado las juntas de estanquidad.

Cuando las ventanas no necesitan ser practicables, la solución se simplifica considerablemente al poder garantizar la estanquidad de antemano.

Las acciones en la parte ciega del divisorio pueden ser semejantes a las que se citarán mas adelante para divisorios interiores. La inclusión de capas de aislamientos térmico generalmente es acorde con los fines acústicos salvo en el caso de espumas rígidas que dan lugar a un bache en la curva de aislamiento de mas de 6 dB en torno a los 600 Hz para 30 mm de espuma encolada a un yeso cartón de 10-13 mm.

En casos en que se conserve únicamente la fachada, rehaciendo interiormente una nueva estructura, debe tenerse especial cuidado con los **muros cortina**, de vidrio u otro material ligero y rígido, pues será causa de una pérdida de aislamiento por transmisiones indirectas, entre recintos contiguos que comparten este muro cortina ya que suele ser la vía de transmisión acústica preferente. Es una situación en cierto modo parecida a las de techos suspendidos comunes en oficinas resultantes de compartimentación de espacios diáfanos.

5. Rehabilitación de divisorios interiores

Cuando se estima conveniente mantener los divisorios interiores existentes y no resul-

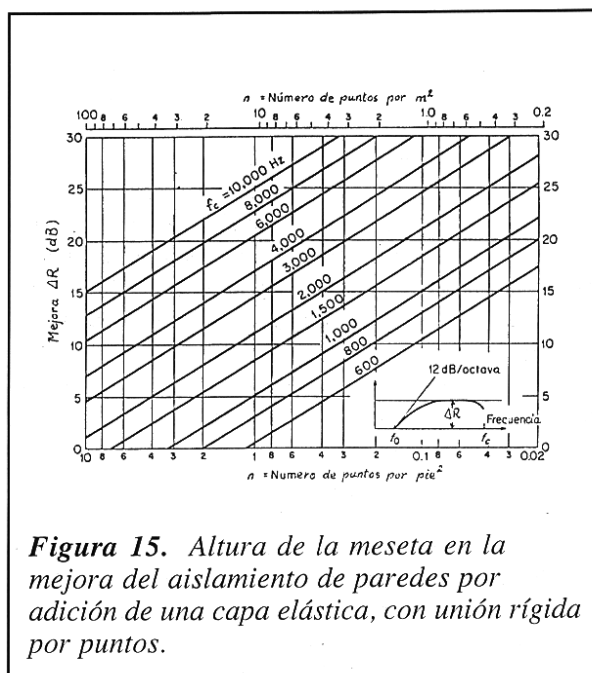


Figura 15. Altura de la meseta en la mejora del aislamiento de paredes por adición de una capa elástica, con unión rígida por puntos.

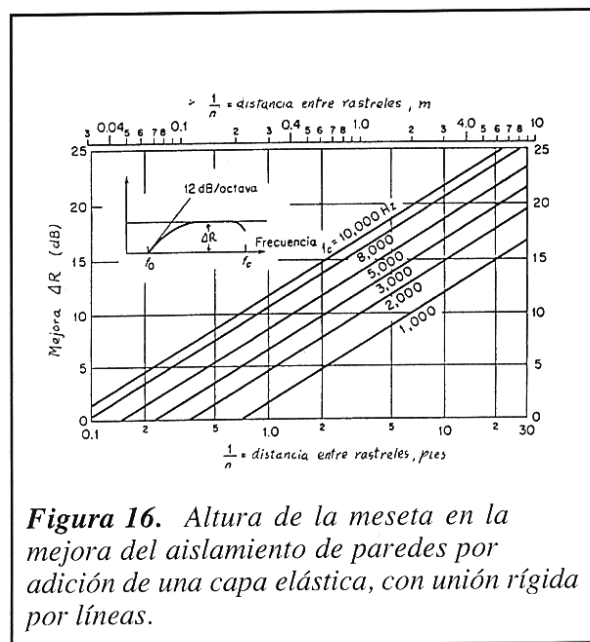


Figura 16. Altura de la meseta en la mejora del aislamiento de paredes por adición de una capa elástica, con unión rígida por líneas.

tan suficientemente aislantes se procede a suplementar su aislamiento. Acústicamente se distinguen dos tipos de actuación fundamentales:

- capa aditiva de gran amortiguamiento
- capa aditiva flexible, con o sin material poroso en la cavidad.
- multicapas combinando efectos de las dos precedentes

En todos los casos adquiere una enorme importancia la formación accidental o necesaria) de puentes acústicos entre ambas hojas.

5.1. Capa con cavidad intermedia.

La adicción de una capa rígida a una preexistente cambia la naturaleza del divisorio, añadiendo nuevas características a las de hojas simple.

En los divisorios de hojas simple se distinguen de modo general cuatro regiones en el rango de frecuencia delimitadas por dos frecuencias fundamentales: la frecuencia natural en vacío y la frecuencia crítica.

Frecuencia natural en vacío: $w_0 = \sqrt{s/m}$, s - rigidez de la pared; m - masa

Frecuencia crítica: $f_c = 64222/h c_1$, h - espesor en m; c_1 - velocidad de fase de las ondas longitudinales. La Figura 7 incluye las frecuencias críticas de materiales de construcción usuales.

En estas zonas se pueden utilizar como fórmulas estimativas del aislamiento las siguientes.

- frecuencias por debajo de w_0

Tabla 1. <i>Rangos de criterio de ruido recomendados para el ruido de inmisión en espacios interiores.</i>		
Tipo de espacio interior	valor del índice de la curva NC	nivel en dB(A).
Salas de concierto y ópera	10 a 20	21 a 30
Estudios de grabación gran calidad	10 a 20	21 a 30
Grandes salas, teatros e iglesias	≤ 20	≤ 30
Estudios de grabación (segundo nivel)	≤ 25	≤ 35
Pequeños auditorios, teatros, iglesias, salas de música y salas de conferencias y reuniones	≤ 35	≤ 42
Dormitorios, hospitales, residencias, hoteles	25 a 40	34 a 47
Oficinas privadas, aulas, bibliotecas, pequeñas salas de conferencias	30 a 40	38 a 47
Salas de estar en viviendas	30 a 40	38 a 47
Oficinas múltiples, laboratorios, salas de diseño, restaurantes	35 a 45	42 a 52
Cocinas, lavanderías, oficinas con mecanografía y/o computadores	45 a 55	52 a 61
Grandes almacenes, tiendas, garajes	50 a 60	56 a 66
Otras (con prevención del riesgo de pérdida de audición)	60 a 75	66 a 80

$$(3) R = 20 \lg s - 20 \lg f - 20 \lg 4\pi \rho_0 c$$

El aislamiento no depende de la masa ni de la rigidez del montaje y de la frecuencia; disminuye con la frecuencia a razón de 6 dB/octava. Para hojas muy livianas y/o si la impedancia específica del segundo medio es muy pequeña comparada con la del primero la fórmula anterior no es válida resultando el aislamiento ser $R = 20 \lg (\rho_1 c_1 / 4 \rho_2 c_2)$, sólo dependiente de la relación entre las impedancias específicas respectivas. Para separaciones aire-agua vale $R = 30$ dB.

-- frecuencias superiores a f_0 e inferiores a f_c

$$(4) R = 20 \lg (m f) - 42 \text{ dB (sistema MKS o SI)}$$

que es la bien conocida **ley de masa** para incidencia normal. Para hojas divisorias muy livianas o impedancias específicas del primer medio muy superiores a las del segundo la fórmula anterior no es válida pudiendo aplicarse la indicada para circunstancias semejantes de la región anterior.

Para divisorios separando dos salas de dimensiones habituales aparecen las influencias del tamaño del divisorio, de las resonancias y del amortiguamiento de la muestra:

$$(5) R = 20 \lg (m f) - 42 - 10 \lg (P_r + P_{nr}) \text{ en donde la parte no resonante vale } P_{nr} = (3/2) + \ln(2f/\Delta f) \text{ (que vale } -5.6 \text{ dB para bandas de } 1/3 \text{ de octava y } -4 \text{ dB para bandas de octava, valores de acuerdo con la fórmula para incidencia de campo), y la parte resonante } P_r = (4 c^2 (a^2 +$$

$b^2) / n^2 \eta (a^2 b^2) \cdot (1 + (2f/f_c) + 3 (f/f_c)^2) / (1 / f_c \sqrt{f f_c})$ que aumenta al disminuir el área de la muestra y al aumentar el factor de pérdidas. En casos prácticos de divisorios entre salas es más importante (unos 3 - 6 dB) que para muestras soportadas en muros de gran tamaño (en teoría infinitos).

Para materiales en placa, es decir de dimensiones más reducidas al del divisorio, puede aplicarse con los mismos fines estimativos la expresión

$$(6) R = 20 \lg (m f) - 42 - \lg (\ln 2 \pi f / c \sqrt{A}) + 20 \lg (1 - (f/f_c)^2)$$

(para frecuencias distintas de las resonancias puras del panel), que indica claramente también que el aislamiento disminuye con el área de la muestra, A, y puede ser utilizada para el caso por ejemplo de vidrios de vetanas.

-- frecuencias superiores a f_c

$$(7) R = 20 \lg (m f) + 10 \lg ((f/f_c) - 1) + 10 \lg \pi - 44 \text{ dB}$$

se observa un incremento del aislamiento con la frecuencia a razón de 9 dB/ octava, así como una influencia significativa del amortiguamiento π .

Esta misma fórmula ha sido obtenida tanto para divisorios infinitos como para una pared entre dos salas.

-- frecuencia natural en vacío $f = f_0$

si el fluido a ambos lados es el mismo $R = 0$ si el amortiguamiento es muy pequeño y si no difiere de la ley de masa únicamente en el término $+ 20 \lg n$.

-- frecuencia crítica $f = f_c$

Para una banda de frecuencia Δf , en torno a la frecuencia crítica, que cumpla

$((\Delta f) / f_c) > (\lambda_c / 2\pi a), (\lambda_c / 2\pi b)$ se obtiene para el aislamiento

$$(8) R = 20 \lg (m f) - 42 + 10 \lg (2 \pi / \pi) (\Delta f / f_c)$$

que está controlada por el amortiguamiento.

La Figura 8 resume lo expuesto.

La adición de una nueva hoja con una cámara de aire intermedia añade sobre la casuística anterior la aparición de unas nuevas resonancias. En bajas frecuencias se debe a las masas

de las dos hojas conectadas por la elasticidad de la cavidad y vale

$$(9) f_r = 60 (m_1 + m_2) / d m_1 m_2$$

conocida por primera frecuencia de resonancia o **resonancia de London**. En altas frecuencias aparecen las **resonancias de cavidad** cada vez que el espesor de ésta iguala un número entero de veces la longitud de onda del sonido incidente

$$(10) f_{rm} = n (c / 2 d), n = 1, 2, 3, \dots$$

Por debajo de la frecuencia de London es válida la ley de masa tomando como tal la suma de las masas de las dos hojas ($m_t = m_1 + m_2$)

$$(11) R = 20 \lg (m_t f) - 42 \text{ dB}$$

Para frecuencias en el entorno de la frecuencia de resonancia el aislamiento es prácticamente cero salvo para amortiguamientos moderadamente altos en que si ambas masas son iguales se obtiene

$$(12) R = R(m_t, w') + 20 \lg \pi \text{ dB}$$

en donde el primer término del segundo miembro significa el valor de la ley de masa para la masa total de las hojas m_t y la frecuencia de resonancia en vacío de las hojas w' .

para frecuencias por encima de la primera frecuencia de resonancia y $k d \ll 1$, ($k = w / c$)

$$(13) R = R(m_1) + R(m_2) + 20 \lg (4 k d)$$

Para frecuencias más altas con kd arbitrario la forma del aislamiento describe arcos entre los mínimos en las resonancias de cavidad y máximos en las antiresonancias. Se encuentra que los mínimos y los máximos de alinean en dos asíntotas. La de los mínimos es la ley de masa para un divisorio la suma de las masas de las dos hojas, es decir, la misma que para frecuencias por debajo de la de resonancia y la de los máximos

$$(14) R = R(m_1) + R(m_2) + 6 \text{ dB}$$

que es superior en 6dB a la suma aritmética de los aislamientos individuales de cada una de las hojas.

La Figura 9 incluye los aspectos señalados.

5.2. Inclusión de absorción en la cavidad

La inclusión de materiales absorbentes en la cavidad produce un cierto desacople entre las dos hojas tanto mayor cuanto mayor es la resistencia al flujo de aire del material. Se puede así aumentar el aislamiento en la zona de bajas frecuencias eliminando incluso la frecuencia de resonancia entre hojas. Para frecuencias superiores se eliminan las resonancias de cavidad y el material atenúa $8.6 \log d$ (dBm-1) al atravesar la capa de material poroso. Ver Figura 10.

5.3. Puentes acústicos

Es bastante frecuente la formación de puentes acústicos entre las dos hojas de divisorios dobles bien por descuido en el montaje bien por necesidad de dotar al divisorio doble de la debida resistencia, como es el caso en construcciones livianas modernas. Cuando la conexión es importante el resultado final no difiere esencialmente del de un divisorio simple de masa la suma de las masas.

Este efecto de **cortocircuito** es incluso muy importante cuando hay material absorbente en la cavidad siempre que se conecten fuertemente las dos hojas, lo que sucede al usar espumas rígidas.

En conexiones mediante rastreles paralelos, n por unidad de longitud del divisorio, se puede usar con éxito la siguiente relación entre la transmisión vía rastreles y vía aire de la cavidad en la zona de resonancias de cavidad

$$(15) (T_r/T_a) = b n c / f_c$$

en donde b es una constante, n el número de rastreles por unidad de longitud y f_c la frecuencia crítica. La transmisión a través de los rastreles es más importante en divisorios con frecuencias críticas bajas.

Si entre los rastreles y una de las hojas la conexión es elástica, la excitación (en energía) de esta hoja se realiza en proporción inversa a la potencia cuarta de la frecuencia para frecuencias por encima de la de resonancia principal del sistema rastrel-muelle-hoja (masa). Esto aconseja usar rastreles flexibles.

Las fijaciones por puntos son más ventajosas que las lineales y cuantas menos de ambas también mejor.

5.4. Capas aditivas en divisorios verticales pesados de albañilería

Una situación corriente del caso anterior es la mejora del aislamiento de divisorios relativamente pesados (generalmente de albañilería). La solución no es sustituir ese divisorio por otro de mayor espesor. La adición de capas flexibles y livianas generalmente da mejores resultados y además permite armonizar con otros requerimientos de aislamiento térmico y cargas sobre la estructura.

Por encima de la frecuencia de resonancia masa-aire-masa se han obtenido fórmulas explícitas para el incremento de aislamiento sobre el de la capa pesada por adición de capas unidas por líneas paralelas o por puntos.

La Figura 11 ilustra los tres casos principales de montaje.

Para unión por puntos el incremento vale

$$(16) \Delta R_p = -10 \lg (0.26 / 3^2 n (c / f_c)^2 + (f_0 / f)^4) + 10 \lg \sigma$$

y para unión por líneas

$$(17) \Delta R_l = -10 \lg (0.64 n (c / f_c) + (f_0 / f)^4) + 10 \lg \sigma$$

siendo

3 -- el factor de aislamiento del soporte flexible (= 1 para soporte rígido),

n -- el número de puntos de sujeción por metro cuadrado en el primer caso y el de líneas de sujeción por metro lineal en el segundo,

f_c -- la frecuencia crítica de la capa liviana,

f_0 -- la frecuencia fundamental de resonancia del sistema masa-aire-masa, y

σ -- el factor de radiación de la pared pesada que se puede estimar según la Figura 12.

La resolución numérica de estas ecuaciones indican un incremento inicial del aislamiento a partir de la frecuencia de resonancia a razón de 12 dB/octava para después alcanzar una zona sensiblemente constante (meseta), hasta la frecuencia de coincidencia donde disminuyen de nuevo fuertemente. Se esquematiza en la Figura 13.

Las Figuras 14, 15 y 16, pueden utilizarse para casos de fijaciones rígidas. Por ejemplo para una capa de yeso-cartón de 13 mm ($f_c =$

2500 Hz), fijada con clavos espaciados 37 cm es rastreles de 5x5 cm separados 600 mm, se obtiene de la Figura 15 para $n = 4$, una altura de meseta de 17 dB. De la Figura 14 se obtiene entrando con 11 Kg/m² y 5 cm de espesor, un valor de 85 Hz para la frecuencia de resonancia. por tanto la curva de mejora arranca del valor 0 dB en 85 Hz, con pendiente de 12 dB/octava hasta alcanzar 17 dB hacia los 200Hz manteniendo esta mejora de 17 dB hasta unos 2500 Hz.

5.5. Rigidizadores

Otra actuación pensable consiste en la rigidización de las hojas. La adición de ribetes, la inclusión de núcleos centrales tipo nido de abeja rígido etc. son acciones de este tipo. El efecto de esta acción es invariablemente una disminución importante del aislamiento en relación al divisorio inicial.

5.6. Capas amortiguadoras

La adición de amortiguación sobre las hojas rígidas principales tiene el efecto de aumentar la masa y el factor de amortiguamiento del conjunto, mejorando el aislamiento por enci-

ma de la frecuencia crítica, pudiendo en ocasiones obtener valores por encima de la ley de masa a frecuencias audibles. En elementos de pequeño tamaño su influencia es más importante al actuar directamente sobre el factor de radiación en las resonancias. Puede observarse también una cierta disminución de la agudeza de la frecuencia de coincidencia. Solo es posible calcular la mejora en situaciones ideales e incluso realizables en laboratorio pero difícilmente transferibles sin más a situaciones reales. En cualquier caso la más mínima explicación requeriría bastante tiempo.

5.7. Transmisiones indirectas

En construcciones reales los valores de aislamiento precedentes se ven seriamente disminuidos por las transmisiones indirectas o de flancos a través de todos los imaginables caminos entre dos recintos más o menos contiguos. Es un problema que por el momento no se puede cuantificar más que en ciertos casos y aun así de modo complicado. Su simple enunciado al igual que en el caso anterior requeriría un tiempo que sobrepasa ampliamente el de esta charla.