

Acondicionamientos Acústicos

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE y METROLOGÍA



Coordinadora PROCAME

M.Sc. Ligia Bermúdez Hidalgo

Equipo de trabajo:

M.Sc. Manfred Murrell Blanco

Licda. Karla Vetrani Chavarría

Licda. Claudia Mannix Sánchez

1 ÍNDICE

2 PERFIL DEL CURSO	3
3 INTRODUCCIÓN	5
4 CONCEPTOS BÁSICOS	6
4.1 Generalidades	6
4.2 Aspectos Geométricos del sonido	7
4.3 Propagación del sonido	10
4.3.1 Campo sonoro directo	12
4.3.4 Tiempo de reverberación	14
4.3.5 Absorción Acústica	15
4.3.5.1 Coeficiente de absorción	15
5. MATERIALES DEL CONFINAMIENTO	16
5.1 Sistemas absorbentes	16
6 AISLAMIENTO ACÚSTICO	24
6.1 Aspectos Teóricos del aislamiento acústico	24
6.1.1 Definición de aislamiento: índice de aislamiento acústico, R	24
6.1.2 Índices descriptivos del aislamiento acústico	25
7 APLICACIÓN DE LA TEORÍA: EJEMPLOS DE CÁLCULOS	39
8 RESPUESTAS DE EJERCICIOS	50
9 BIBLIOGRAFIA	51
10 LINKS Y PÁGINAS DE INTERÉS	52

2

PERFIL DEL CURSO

Objetivo general

- Conocer los principios fundamentales sobre el diseño de confinamiento acústico

Objetivos específicos

- Conocer los conceptos básicos en términos de confinamiento acústico
- Estudio de los métodos de confinamiento
- Demostrar la manera en que se realiza el confinamiento acústico

Dirigido a

- Estudiantes, especialistas y técnicos vinculados con gestión ambiental, salud ocupacional, industria y comercio y actividades afines.

Contenido temático

- Conceptos de confinamiento
- Coeficientes de absorción
- Materiales del confinamiento
- Diseño del confinamiento
- Tiempo de Reverberación

Estrategia metodológica

- Exposición/presentación por parte del instructor
- Trabajo individual
- Evaluación cualitativa y sistemática de los participantes a través de sus intervenciones y de su participación en foros de discusión
- Recursos audiovisuales.
- Análisis de casos y prácticas.

Duración

- 30 horas. El curso se impartirá 20 horas en cinco sesiones de cuatro horas cada una de forma virtual y 10 horas en un Proyecto Asistido a Distancia.

Proyecto asistido a distancia

- Este proyecto será evaluado a partir de la comprensión de los conceptos básicos y ejercicios prácticos desarrollados en clases.

Evaluación

- Examen final 70%
- Proyecto asistido a distancia 30%

3 INTRODUCCIÓN

En nuestro país, como requisito para obtener la Patente de espectáculos públicos, como por ejemplo: Música en vivo, reproducción de Videos musicales, restaurantes, bares, Salones de Baile, Salones de Eventos y similares, se requiere la elaboración de un Plan de Confinamiento de Ruidos, el cual consiste en un documento técnico solicitado por el Ministerio de Salud de Costa Rica y municipios.

Se regula también las intensidades sonoras producidas por Industrias, Talleres, Oficinas, Hoteles, Clubes privados y todo aquel recinto que genere ruido y sobrepase los límites establecidos en el Reglamento de Control de Ruido. Estos máximos están normados de acuerdo al área geográfica y tipo de actividad generadora del ruido. (Prosera, 2015)

El objetivo de dicho Plan es el de proveer a la edificación de una serie de elementos internos capaces de retener y absorber la energía generada en su interior. La retención o confinamiento cumple con la tarea de que los ruidos escapen de una forma moderada, controlada y natural por las diferentes vías de la estructura (puertas, ventanas, hendidias etc.). La Energía diseñada se mide en decibeles (db). (Prosera, 2015)

Es por ello que basados en el Decreto N°32692-S, Procedimiento para la Medición de Ruido, vigente en nuestro país, donde se establece la elaboración de informes y acciones correctivas para el control de ruido en áreas de entretenimiento, industriales y/o en los que debido a las actividades que se realizan es necesario la elaboración de un Plan de Confinamiento de Ruido.

Para este curso, aprenderemos conceptos básicos sobre el confinamiento de ruido.

4

CONCEPTOS BÁSICOS

4.1 Generalidades

En la acústica existen cuatro tipos de representaciones (Igua, 2005):

- **Acústica geométrica.** Se asocia a una onda sonora que se propaga un rayo. Cuando las longitudes de onda son pequeñas en comparación con las dimensiones de la sala y los obstáculos interiores (no hay difracción) y el coeficiente de absorción de las paredes es bajo, se cumple la ley de reflexión. Una fuente sonora puntual colocada delante de una plano reflector producirá una fuente imagen a igual distancia del plano, en su posición simétrica. La potencia efectiva de la fuente imagen dependerá de la absorción de la pared.

- **Acústica estadística.** Imaginemos una fuente acústica que irradia energía en el interior de una sala. Al principio las ondas sonoras se propagan libremente en el interior del recinto. A partir de cierto instante, las ondas comienzan a reflejarse en las paredes, de modo que las ondas reflejadas y los incidentes se superponen. Si en un determinado instante la fuente deja de emitir, el sonido no desaparece inmediatamente, sino que persiste hasta que es absorbido por las paredes. Esto es lo que se denomina reverberación. Para estudiar este fenómeno no basta con examinar el camino seguido por los rayos sonoros emitidos por la fuente, sino que hay que realizar un estudio estadístico de todos los rayos presentes en el recinto.

- **Acústica ondulatoria.** Tiene en cuenta el carácter ondulatorio del sonido. Aborda el problema de la resolución de la ecuación de ondas con sus correspondientes condiciones de contorno. Permite conocer las resonancias de una sala y cuando tienen importancia.

- **Acústica arquitectónica.** La acústica arquitectónica deriva del desarrollo de siglos de la acústica y la necesidad de una calidad adecuada de música

y palabra, pero recién en el siglo XX se constituye en ciencia. Su mayor expresión se manifiesta en la elaborada y compleja arquitectura de las grandes salas, pero es de aplicación en recintos más simples para los que se requiere inteligibilidad, privacidad y confort acústico. La Acústica Arquitectónica estudia 14 los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, ya sea una sala de concierto o un estudio de grabación. Esto involucra también el problema de Aislación acústica.

Las habitaciones o salas dedicadas a una aplicación determinada (por ejemplo para la grabación de música, para conferencias o para conciertos) deben tener cualidades acústicas adecuadas para dicha aplicación. Por cualidades acústicas de un recinto entendemos una serie de propiedades relacionadas con el comportamiento del sonido en el recinto, entre las cuales se encuentran las reflexiones tempranas, la reverberación, la existencia o no de ecos y resonancias, la cobertura sonora de las fuentes, etc. Esta última es la requerida para realizar este proyecto.

Estas se irán desarrollando en los próximos temas del módulo, para este curso nos enfocaremos en los aspectos geométricos del sonido.

4.2 Aspectos Geométricos del sonido

Según la Teoría Geométrica el sonido se considera como una serie de rayos (sin entidad física, debido a que son tratados como líneas que se dibujan perpendiculares al frente de onda) que se propagan por el interior del recinto en línea recta y en todas direcciones. (Sintec, s.f.)

La Teoría Geométrica se utiliza para determinar puntos acústicamente conflictivos, como por ejemplo las focalizaciones del sonido producidas por una vuelta arquitectónica o una superficie cóncava. Esta Teoría también es útil para calcular los retrasos relativos entre la señal directa y las reflexiones y analizar el efecto de ecos o reflexiones problemáticas. (Sintec, s.f.)

Los métodos utilizados verifican la **Ley de la Reflexión de la Óptica Geométrica** que se enuncia de la siguiente manera: “Los rayos sonoros incidentes y reflejados permanecen en el mismo plano, donde el ángulo de

incidencia y el de reflexión son iguales.” (Sintec, s.f.)

4.2.1 REFLEXIÓN

La onda reflejada conserva la misma frecuencia y longitud de onda que la onda incidente, pero disminuye su amplitud y por tanto su intensidad.

Cuando la onda choca con cualquier obstáculo, la onda reflejada actúa como si procediera de una fuente sonora virtual situada detrás del obstáculo a una distancia igual a la de la fuente sonora real. (Sintec, s.f.)

El comportamiento de las ondas reflejadas depende por tanto de la forma del local y de las características de su superficie. Si la superficie de impacto es convexa la onda se dispersará y si es cóncava se producirá un efecto de concentración. (Sintec, s.f.)

4.2.2 ABSORCIÓN

Es el fenómeno debido al cual una parte de la energía sonora que incide sobre una superficie se disipa en forma de calor mediante varios procesos de rozamiento y no se refleja ni transmite. (Sintec, s.f.)

El **coeficiente de absorción (α)** de un material expresa la cantidad de energía sonora que es absorbida por el mismo. Se define como la relación entre la energía sonora absorbida por el material y la energía sonora incidente (Sintec, s.f.):

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}}$$

El coeficiente de absorción de un material es función de su naturaleza, es decir, densidad, porosidad, espesor, características constructivas, etc.

A modo de ejemplo, el valor α a 1000 Hz del mármol es de 0,01 y el de lana de roca de 30 mm de espesor es de 0,92.

4.2.3 TRANSMISIÓN

Cuando un frente de ondas incide sobre una pared de una sala que se halla conectada a otra por una pared común, ésta se pone en movimiento vibratorio radiando energía hacia la sala receptora. (Sintec, s.f.)

La relación entre la energía transmitida y la energía incidente sobre una pared divisoria que separa dos salas se denomina factor de transmisión sonora (τ) y viene dado por la expresión (Sintec, s.f.):

$$T = \frac{E_{\text{transmitida}}}{E_{\text{incidente}}}$$

La energía que incide sobre una superficie se absorbe, refleja y/o transmite, cumpliéndose la expresión:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{transmitida}} + E_{\text{reflejada}}$$

4.2.4 DIFRACCIÓN

En la difracción una onda puede rodear un obstáculo o propagarse a través de una pequeña abertura. Aunque este fenómeno es general, su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura. Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura. (Sintec, s.f.)

Un ejemplo de este fenómeno es la difracción de sonido que se produce sobre una pared, creándose una zona de sombra acústica (Sintec, s.f.):



Imagen N°1. Representación de Difracción

4.2.5 REFRACCIÓN

Recibe el nombre de refracción el cambio de dirección que sufre una onda sonora al pasar de un medio a otro con distintas propiedades mecánicas. Este cambio se produce por la variación que sufre la velocidad de la onda sonora. (Sintec, s.f.)

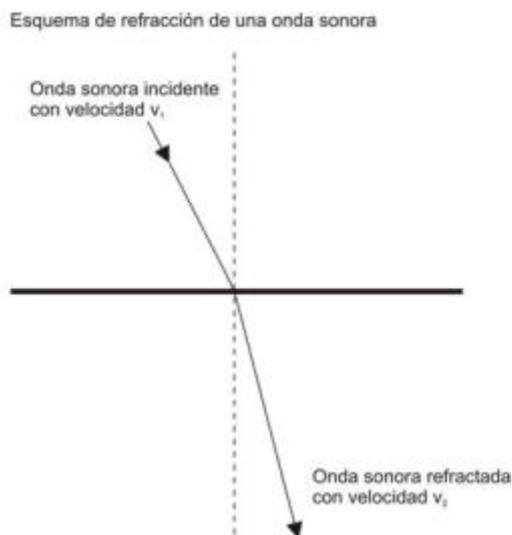


Imagen N°2. Representación de Refracción

4.3 Propagación del sonido

En un recinto o local cerrado las ondas emitidas por una fuente llegan a un punto determinado básicamente por dos caminos. Por una parte, se recibe

energía sonora directamente de la fuente y, por otra, las ondas sonoras chocan con las superficies que limitan el local dando origen a ondas reflejadas las cuales a su vez se reflejan nuevamente repitiéndose el fenómeno multitud de veces. (Sintec, s.f.)

Por tanto, la presión acústica que existe en un punto determinado del recinto después de haberse producido varias reflexiones del sonido, es la resultante de las presiones de las ondas emitidas en distintos momentos y las recibidas en el instante de la observación. Dicho en términos más sencillos, la presión en dicho punto es el resultado de la presión del campo directo y la del campo reverberante. (Sintec, s.f.)

Considerando una fuente con radiación omnidireccional ($Q=1$), el nivel de presión sonora L_p en un punto viene dado por la expresión:

$$L_p = L_W + 10 \log \frac{Q(=1)}{4\pi d^2} + \frac{4}{R}$$

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

Donde:

L_W nivel de potencia sonora de la fuente.

d distancia del punto considerado a la fuente.

R constante del recinto. Da idea de la “cantidad” de absorción acústica de la sala.

α coeficiente de absorción medio del recinto.

S superficie total.

4.3.1 Campo sonoro directo

El campo sonoro directo es el que se transmite directamente de la fuente al punto de observación y no considera reflexiones de sonido en las superficies del recinto por lo que es independiente del mismo. (Sintec, s.f.)

El nivel de presión sonora de campo directo tiene el mismo valor a una distancia determinada que el que tendría al aire libre alejado de cualquier superficie reflectante. (Sintec, s.f.)

La expresión simplificada que determina el nivel de presión sonora de campo directo para una fuente de potencia L_W con radiación omnidireccional a una distancia d , es (Sintec, s.f.):

$$L_{PD} = L_W - 20 \log d - 11$$

4.3.2 Atenuación por distancia

En campo libre y lejano y para una fuente sonora puntual con propagación esférica se cumple que el nivel de presión sonora decae a razón de 6 dB cada vez que se dobla la distancia entre la fuente y el receptor, lo que se representa en la siguiente ecuación:

$$L_{P1} - L_{P2} = 20 \log \frac{d_2}{d_1}$$

L_{P1} nivel de presión en un punto dado cercano a la fuente.

L_{P2} nivel de presión en otro punto.

d_2 distancia del punto 2 a la fuente de ruido.

d_1 distancia del punto 1 a la fuente de ruido.

Esta relación es válida en campo libre, donde no existen reflexiones. En el caso de recintos, esta relación sigue siendo válida, pero además debe añadirse la componente de campo reverberante. (Sintec, s.f.)

Si la fuente sonora es lineal (ejemplo: autopista) y en campo libre la propagación es cilíndrica, la reducción es de 3 dB por cada duplicación de la distancia. (Sintec, s.f.)

4.3.3. Campo sonoro reverberante

El campo sonoro reverberante es la energía sonora que llega al punto de observación y que corresponde a las ondas sonoras que han impactado una o múltiples veces contra la superficies que limitan el local. (Sintec, s.f.)

El nivel de presión producto del campo sonoro reverberante depende de la potencia de la fuente sonora L_w y de las características acústicas del recinto únicamente (formas geométricas, coeficientes de absorción de los materiales, volumen de la sala, etc.) (Sintec, s.f.)

Si el nivel de presión sonora es uniforme en todo el local, se dice que el sonido es difuso. Ahora bien, el sonido en un local es perfectamente difuso si las ondas sonoras reflejadas viajan en todas las direcciones con igual probabilidad. (Sintec, s.f.)

El nivel de presión sonora del sonido reflejado en un local cerrado L_{PR} , considerando que la fuente de ruido ha estado funcionando el tiempo suficiente como para alcanzar un nivel sonoro estable, viene dado por (Sintec, s.f.):

$$L_{PR} = L_w - 10\text{Log}A + 6$$

L_w nivel de potencia sonora de la fuente.

A absorción total del recinto en Sabins.

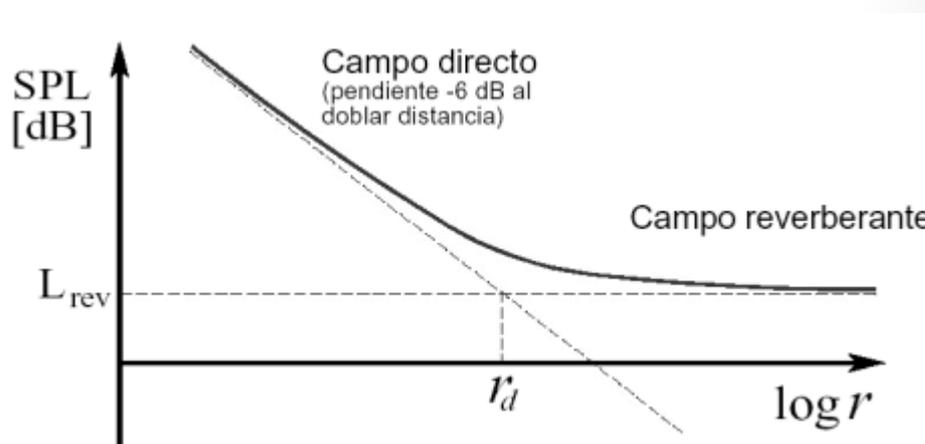


Imagen N°3. Campo sonoro reverberante

En cada punto del recinto se tiene la contribución del campo sonoro directo (pendiente -6dB al doblar distancia) y del reverberado (constante para cualquier distancia). Tal y como se aprecia en la Figura 3, a medida que la distancia del receptor a la fuente aumenta, la contribución del campo directo es menos importante en favor de la del campo reverberado hasta llegar a la **distancia crítica (r_c)** en la que ambas contribuciones al campo total son iguales. (Sintec, s.f.)

4.3.4 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (TR_{60}) es el tiempo en segundos que tarda el nivel de presión sonora en reducirse 60 dB después de interrumpir la emisión de la fuente sonora. (Sintec, s.f.)

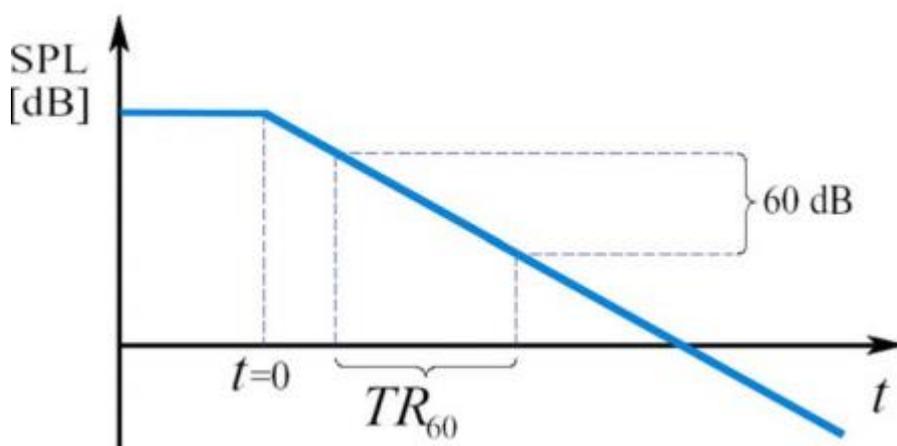


Imagen N°4. Representación tiempo de reverberación

Puede calcularse con la aproximación de Sabine según la siguiente expresión:

$$TR_{60} = \frac{0,163V}{A}$$

V volumen del local en m^3

A absorción del local en Sabins

El tiempo de reverberación es dependiente de la frecuencia, como se desarrollará más adelante. (Sintec, s.f.)

4.3.5 Absorción Acústica

4.3.5.1 Coeficiente de absorción

La absorción acústica de un recinto se obtiene multiplicando el área de cada superficie del local por su coeficiente de absorción sonora α , dependiente de la frecuencia. La suma de cada término es la absorción total del local (Sintec, s.f.):

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

α_n coeficiente de absorción de cada material (variable con f).

S_n superficie del material en m^2 con coeficiente de absorción α_n .

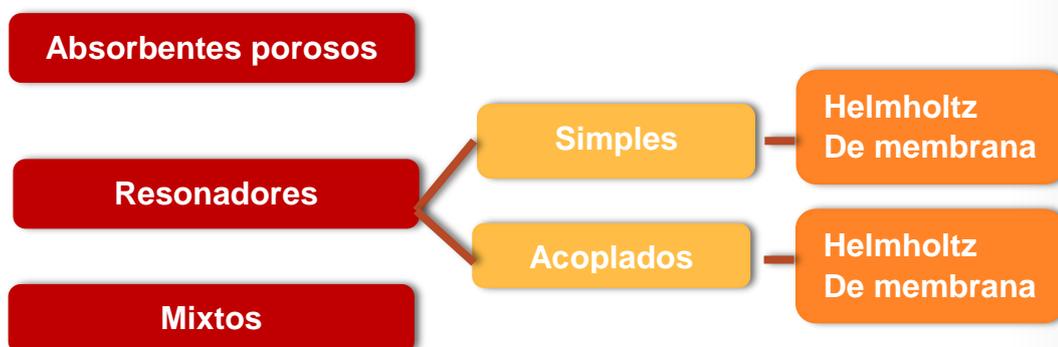
La unidad de absorción es el Sabin. 1 Sabin equivale a $1m^2$ de superficie absorbente con coeficiente de absorción 1 (ventana abierta).

Una sala de elevada absorción, por tanto con tiempo de reverberación bajo, es una sala “apagada” (pej. estudio de grabación). En caso contrario se puede hablar de una sala “viva” (pej. lavabo alicatado).

5. ■ MATERIALES DEL CONFINAMIENTO

5.1 Sistemas absorbentes

Para dar solución a los problemas ocasionados por la excesiva reverberación de los locales cerrados (lo que puede debilitar el aislamiento de un recinto o empeorar la calidad acústica de una sala) existen varios sistemas o dispositivos creados para tal fin, que se pueden clasificar según:



- **Materiales porosos:** disipan la energía acústica transformándola en calor. Su principal eficacia es para frecuencias medias y altas, donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados (fibra de vidrio, lana mineral, corcho, etc). (Pérez, 2001)
- **Materiales para argamasa:** son materiales acústicos que se aplican en estado húmedo con paleta o pistola para formar superficies continuas de un espesor deseado. Se conocen también como morteros acústicos. (Pérez, 2001)
- **Membranas resonadoras:** convierten la energía sonora en mecánica al deformarse ondulatoriamente un panel al ser excitado por el sonido. Las absorciones máximas son para bajas frecuencias. (Pérez, 2001)
- **Resonadores de Helmholtz:** la disipación de energía se produce al hacer oscilar las ondas sonoras el aire contenido en las pequeñas cavidades que presenta el material. Su coeficiente de absorción es muy elevado, pero abarca una banda de frecuencias muy estrecha, también en la zona de bajas frecuencias. Poniendo material poroso en el interior de las cavidades se amplía la anchura de la banda, pero disminuye el coeficiente de absorción. (Pérez, 2001)

5.2 MATERIALES POROSOS

Estos materiales presentan un gran número de pequeñas cámaras de aire o poros que se comunican entre sí. Su estructura puede ser alveolar, granular, fibrosa, etc. Actúan convirtiendo la energía sonora en calor, debido al rozamiento entre el aire y la superficie del material. Los materiales con celdas interiores de superficie cerrada no son buenos absorbentes. (Pérez, 2001)

El coeficiente de absorción de un material poroso aumenta con la frecuencia por norma general y está además influenciado por el espesor del material. No obstante, como la mayoría de espesores que se utilizan normalmente está limitada por problemas de espacio y costo, la absorción acústica de los materiales porosos es elevada a altas frecuencias y limitada en los graves. Los factores que rigen el comportamiento de un material absorbente son: densidad, porosidad,

geometría estadística de las celdillas, rigidez de la estructura, colocación respecto superficies rígidas, etc. (Pérez, 2001)

La velocidad con que se mueve el aire debido a una onda sonora, es máxima a una determinada distancia de las superficies rígidas correspondiente a un cuarto de la longitud de onda de la onda incidente ($v_{\text{máx}}$ a $d=\lambda/4$). Para la velocidad máxima, también es máximo el rozamiento y, por tanto, la absorción. (Pérez, 2001)

A modo de ejemplo se muestran en la siguiente tabla los coeficientes de absorción de dos materiales de comportamiento muy distinto, el mármol que es un mal absorbente y una lana mineral:

Material / frecuencia [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Mármol	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Lana de roca 30 mm	0,07	0,40	0,88	0,92	0,96	1,05

I. Materiales poroso-rígidos

Se usan como yesos absorbentes sonoros con una estructura granular o fibrosa de tela o esterilla hecha con material orgánico o lana artificial, o de losetas acústicas y bloques comprimidos de fibras con aglutinantes. Los yesos absorbentes sonoros son resistentes y se montan con facilidad siempre que la superficie que los recibe esté preparada. (Pérez, 2001)

La disminución en el espesor del material causa la disminución del coeficiente de absorción al reflejarse parte de la energía sonora en la superficie rígida de soporte y volver al interior del recinto. Esto ocurre sobre todo a las frecuencias de 250, 500 y 1.000Hz. Si se montan dejando un espacio de aire entre el material y la pared, aumenta la absorción sobre todo a 250Hz y algo a 125Hz, disminuyendo algo a 500Hz. De todas formas es conveniente solicitar del fabricante la información técnica en función de los diferentes tipos de montaje, a la hora de utilizar valores reales. (Pérez, 2001)

Estos materiales suelen presentarse en forma de paneles o tableros acústicos de fácil instalación. También suelen poder colocarse como techo

suspendido mediante elementos metálicos, aunque pueden darse problemas por la flexión de los materiales. Los sistemas de suspensión mecánica permiten la combinación de techos absorbentes con la iluminación, aire acondicionado y elementos de calor radiante. Los tamaños oscilan normalmente desde 30x30cm a 30x60cm, y espesores de 1 a 3cm. También, según su formación, presentan diferentes propiedades como apariencia estética, facilidad de limpieza, posibilidad de pintado, reflectancia lumínica, resistencia al fuego, etc..

Una de sus ventajas principales es su fácil adaptación tanto en edificios nuevos como en los ya construidos.

Como conclusiones sobre este tipo de materiales se puede decir que (Pérez, 2001):

- La capacidad de absorción disminuye con la reducción del espesor de la capa.
- El coeficiente de absorción disminuye a bajas frecuencias.
- La presencia de un espacio de aire entre el material y la pared rígida origina un aumento de la absorción a bajas frecuencias y también en el valor máximo del coeficiente de absorción sonora.

II. Materiales poroso-elásticos

Si el material absorbente presenta un esqueleto no rígido sino elástico, dicho esqueleto estará sujeto a vibraciones al igual que el aire contenido en los poros. Estos sistemas se suelen instalar como sistemas de dos capas con la formación capa de material absorbente-aire-capa de material-aire-pared. Las conclusiones sobre este material son (Pérez, 2001):

- Un aumento en el número de capas del sistema, de una a dos, aumenta de manera importante las frecuencias para las que el coeficiente de absorción es relativamente alto.
- Para aumentar la anchura de la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia, se aumenta la distancia entre capas a medida que nos alejamos de la pared rígida.
- Para evitar saltos en la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia, los espacios de aire no deben ser iguales ni múltiplos unos de otros.

5.2.2 RESONADORES

Estos sistemas consisten en paneles separados que rompen la impresión de continuidad de la superficie en el tratamiento decorativo de las paredes del recinto en que se aplican. El tipo más usado es el de panel metálico perforado con relleno de fibra mineral. Suelen ser paneles de $60 \times 30 \text{ cm}$ de acero o aluminio perforado y relleno de lana mineral envuelto en papel ligero ignífugo para prevenir pequeños desprendimientos del relleno. El panel suele llevar un acabado en esmaltes que los hace adecuados en instalaciones donde se necesiten frecuentes lavados. (Pérez, 2001)

El tipo más simple de resonador absorbente es el de Helmholtz. Consiste en un pequeño volumen de aire dentro de una cavidad en contacto con el aire del recinto a través de una pequeña abertura que es el cuello del resonador. Una onda acústica, al incidir sobre el cuello, hace que el aire vibre transmitiendo esta vibración a la cavidad donde sufre compresiones y enrarecimientos sucesivos. Presentan un coeficiente de absorción muy localizado en una banda estrecha de frecuencias, pero con valores muy altos, cercanos a la unidad. El resonador se puede diseñar específicamente para atacar una banda de frecuencias determinada. Si se amortigua el resonador forrando la cavidad y el cuello con un material poroso, entonces el resonador amplía la banda de frecuencias en que es eficaz, pero disminuyendo el valor máximo que presenta de coeficiente de absorción a casi la mitad. Esto se puede observar en la imagen N°5

Los resonadores de Helmholtz se suelen emplear donde existe una gran reverberación a una determinada frecuencia, para reducir este valor sin afectar al resto de frecuencias en la reverberación.

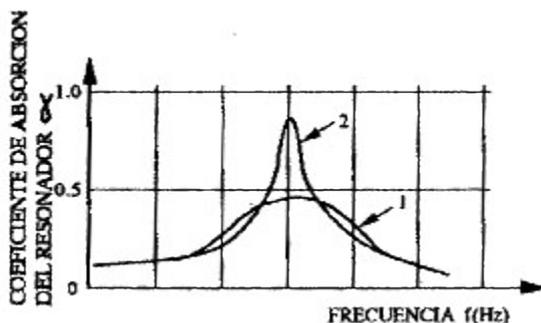


Imagen N°5. Variación del coeficiente de absorción.

Como conclusiones sobre estos sistemas de paneles perforados se puede decir que (Pérez, 2001):

- El coeficiente de absorción de estos sistemas está definido por la inercia y la resistencia del aire en los agujeros del sistema.
- La variación del coeficiente de absorción con la frecuencia presenta un máximo claramente definido.
- La frecuencia a la que el coeficiente de absorción presenta un máximo aumenta con el incremento del diámetro de las aberturas y con una reducción de la distancia entre ellas, o entre la capa perforada y la pared.
- El sistema se puede calcular para unos parámetros dados, permitiendo la absorción sonora necesaria, dentro de las bandas de frecuencia en que el sistema sea eficaz.

I. Sistemas de paneles rígidos o membranas resonadoras

Estos sistemas se basan en el hecho de que una onda acústica es parcialmente absorbida cuando encuentra en su camino cuerpos capaces de vibrar a su propio ritmo. Si el cuerpo que se encuentra tiene unos modos de vibración discretos, absorbe sólo algunas de las frecuencias y por tanto la absorción es selectiva. Como el panel tiene inercia y amortiguamiento, parte de la energía sonora incidente se convierte en energía mecánica y se disipa en forma de calor, por eso absorbe sonido. Pero al entrar el panel en vibración, él mismo actúa como radiador sonoro, por lo que en estos sistemas el coeficiente de absorción no suele ser superior a 0,5. (Pérez, 2001)

Se ha comprobado que un cambio en la distancia del sistema vibratorio a la pared rígida, como en los materiales porosos, tiene influencia en el valor del coeficiente de absorción y en su variación con la frecuencia (al aumentar la distancia, la frecuencia de resonancia disminuye). Si se quiere desplazar el coeficiente de absorción hacia las bajas frecuencias, se puede rellenar el espacio entre la pared y el sistema con materiales absorbentes, como lana de vidrio, aumentándose también el pico que presente el coeficiente de absorción. (Pérez, 2001)

Estos materiales tienen ventajas respecto a los porosos como son la resistencia a los golpes, duración y posibilidad de tratar o redecorar la superficie. Pueden barnizarse, pulirse o pintarse.

Estos paneles suelen crear en el recinto un campo sonoro más difuso, ya que una onda plana que se refleja desde una superficie vibrante pierde sus propiedades direccionales. (Pérez, 2001)

Para la sujeción de los paneles es recomendable utilizar arandelas amortiguadas que no pierdan sus propiedades elásticas con el tiempo, sin comprimirlas demasiado durante el montaje.

Las conclusiones sobre estos materiales son (Pérez, 2001):

- La variación del coeficiente de absorción con la frecuencia de un sistema vibratorio rígido, se representa en forma de una curva de resonancia.
- La capacidad de absorción depende de la elasticidad de estos materiales, así como de su peso específico, dimensiones, y del procedimiento de sujeción de los paneles, así como de su posición relativa respecto a la pared rígida, y del relleno de los espacios entre el sistema y la pared.
- El amortiguamiento de los bordes de los paneles y relleno de los huecos con materiales blandos, produce un aumento del coeficiente de absorción y un cambio hacia la zona de bajas frecuencias del valor máximo del coeficiente de absorción.

II. Absorbentes suspendidos

Bajo este epígrafe se agrupan materiales y estructuras acústicas que están suspendidas del techo del recinto como unidades individuales. Normalmente toman la forma de láminas planas o pantallas de material absorbente, colgadas verticalmente en hileras continuas, o bien unidades con forma de cajas vacías suspendidas del techo. (Pérez, 2001):

Estos tipos tienen su aplicación principal en zonas donde un tratamiento acústico del techo de tipo convencional es impracticable por algún motivo. En las figuras 5 y 6 se aprecian montajes de este tipo. (Pérez, 2001):

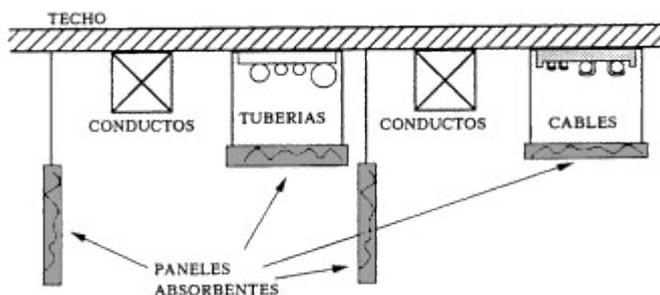


Figura 6. Absorbentes suspendidos.

La absorción sonora de los absorbentes suspendidos se establece normalmente como los metros cuadrados de absorción suministrados por cada unidad. Este valor aumenta con el espaciado de los absorbentes y se aproxima a un valor constante con espaciados amplios. Evidentemente, al aumentar los espaciados disminuye el número de paneles que se pueden instalar en una zona determinada y el efecto total de los absorbentes en esa zona también disminuye. Con espaciados más pequeños, la eficacia en metros cuadrados por absorbente disminuye algo y el coeficiente de

absorción de techo equivalente aumenta, pero no en proporción al número de absorbentes. (Pérez, 2001)

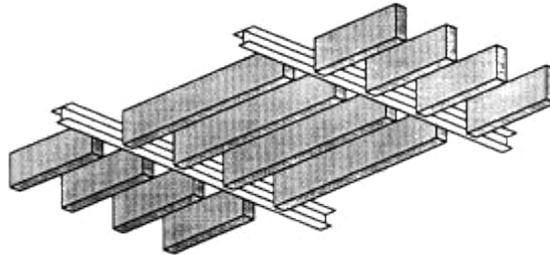


Figura 7. Absorbentes suspendidos.

La efectividad de los absorbentes suspendidos en una zona de techo en comparación con un tratamiento total de dicha zona, se puede determinar dividiendo el número de metros cuadrados suministrados por cada absorbente por el área de techo ocupada por el mismo. El coeficiente de absorción del techo equivalente que resulta de los absorbentes es una medida de la efectividad en la zona y es directamente comparable con el coeficiente de un tratamiento de techo continuo en la misma. (Pérez, 2001)

Un absorbente suspendido típico de tipo pantalla es un tablero de fibra mineral de $1.2 \times 0.6 \text{ m}$ con un espesor de 3.8 cm , cubierto con una membrana plástica lavable, delgada e impermeable, que transmite las ondas sonoras con buena eficacia en la mayor parte del espectro sonoro. El espaciado entre paneles varía entre 0.6 m a 1.8 m y las hileras pueden correr en una o dos direcciones. En la figura 7 se observa el coeficiente de absorción equivalente de un absorbente suspendido tipo pantalla, en función de la frecuencia, para dos separaciones distintas. (Pérez, 2001)

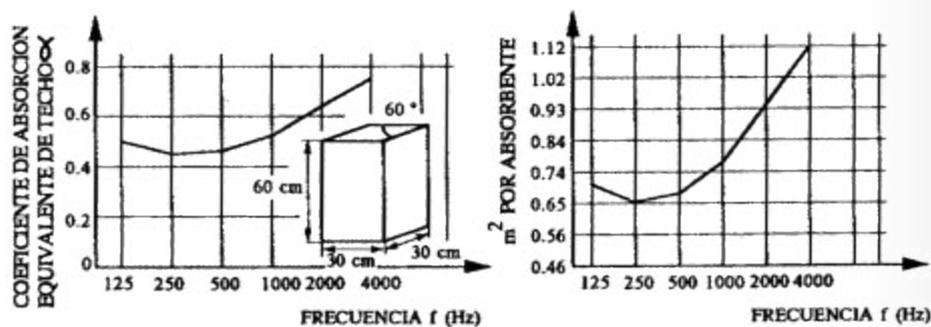


Figura 8. Coeficiente de absorción de un absorbente **suspendido**.

5.2.3 MIXTOS

Resultan de la combinación de absorbentes resonadores y materiales porosos, los cuales se suelen aplicar forrando el interior de las cavidades que componen el resonador, mejorando así las características de absorción

del sistema.

Esta información se desarrollará en el tema N°5 del presente Módulo

6 AISLAMIENTO ACÚSTICO

6.1 Aspectos Teóricos del aislamiento acústico

6.1.1 Definición de aislamiento: índice de aislamiento acústico, R

Podríamos definir, de una manera general, el Aislamiento Acústico entre dos recintos como la cantidad de energía sonora que se pierde o atenúa al propagarse del recinto emisor al recinto receptor. En la práctica se tratará de calcular el aislamiento que produce una partición como puede ser una pared,

fachada, forjado etc. (es decir, una superficie o elemento material que separa ambos recintos). Más adelante se explicará la complejidad que supone este problema ya que salvo en condiciones muy concretas, sólo existentes en el laboratorio, cuando se trata de medir el aislamiento que causa una partición es preciso tener en cuenta que el sonido no pasa de un lugar a otro únicamente a través de la partición en cuestión sino que es frecuente que lo haga a través de otros caminos como pueden ser, por ejemplo, los conductos de ventilación, las paredes laterales etc.

Se define un índice de aislamiento acústico, R , a partir de la relación entre la potencia que se transmite al recinto receptor P_t , y la que incide sobre el elemento de separación del recinto emisor P_i . El coeficiente Tau se denomina coeficiente de transmisión sonora y se define como:

$$\tau = \left(\frac{P_t}{P_i} \right)$$

El Índice de Aislamiento Acústico se define en función de Tau como:

$$R = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right) \quad (dB)$$

Esta relación también se conoce como Pérdida de Transmisión y expresa en escala logarítmica qué parte de la energía incidente en una partición que separa dos estancias se transmite o atraviesa dicha separación. Por ejemplo, si tenemos una pared con un índice $R=30dB$, significa que de la energía sonora que incide en ella tan solo la milésima parte será capaz de atravesarla.

6.1.2 Índices descriptivos del aislamiento acústico

La manera más sencilla de abordar un problema de aislamiento acústico a ruido aéreo es por medio de la magnitud Aislamiento Bruto, D , que se define como:

$$D = L1 - L2 \quad (dB)$$

Dónde:

$L1$ expresa el nivel de presión sonora en la sala emisora

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA

L2 el nivel en la sala receptora.

De estos niveles es preciso comentar en primer lugar que están promediados tanto en tiempo como en espacio. En segundo lugar decir que los cálculos se han de hacer para cada banda de frecuencia, por ejemplo en tercios de octava.

El promediado en espacio merece especial atención. Al medir el nivel sonoro en un recinto es necesario hacerlo en diferentes puntos del mismo ya que el campo sonoro no es constante en él. Si se escogen los distintos puntos de manera correcta y se promedian, se tendrá un valor fiable del nivel acústico en dicho recinto. Si obtenemos una sola medida, corremos el riesgo de que sea en un punto donde hay un máximo o un mínimo de campo, lejos del nivel medio en la totalidad del recinto.

El aislamiento bruto, D , de una partición separadora entre dos salas o estancias, no da una verdadera medida sobre dicha partición ya que la medida del nivel sonoro en la sala receptora en un instante, proviene de la energía sonora de la sala emisora en ese instante más la energía de algún tiempo atrás, que se ha reflejado en las paredes. La reverberación de la habitación receptora está influyendo de esta manera en nuestra medida. Si introducimos un término corrector que contrarreste la influencia de la reverberación, tendremos una medida más precisa y esto se lleva a cabo mediante la magnitud Aislamiento Normalizado, R , que se define:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) = D + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (dB)$$

En esta ecuación, S es la superficie de separación en m^2 y A es la absorción del local, que podemos calcular despejando en la ecuación de Sabine:

$$T = 0.161 \cdot \frac{V}{A}$$

Por medio de la magnitud R tendremos pues, una medida más precisa que con el aislamiento bruto. Es posible que ambas magnitudes coincidan, ($D = R$), circunstancia que se dará cuando los valores de S y A sean iguales en

m2. En otro caso, el valor del aislamiento normalizado será mayor que el del bruto, ($D < R$).

6.2 Aislamiento a ruido aéreo de paredes. Ley de masas

6.2.1 Aislamiento de paredes simples. Ley de masas para paredes simples

Se puede definir la pared simple como aquella en la que todos sus puntos de la masa sobre una misma normal no varían la distancia entre sí cuando la pared vibra. Esto no significa que la pared tenga que ser homogénea, sino que puede estar formada por varias capas de distintos materiales mientras cumpla la condición anterior.

Supongamos que tenemos una onda acústica que incide perpendicularmente sobre una pared. El aislamiento de ésta puede estimarse por medio de sus propiedades mecánicas. Así, la Ley de Masas para incidencia normal permite calcular dicha magnitud y se expresa como:

$$R = 20 \cdot \log\left(\frac{M \pi f}{Z}\right) \quad (dB)$$

Dónde:

M es la masa por unidad de superficie,

f la frecuencia de la onda incidente y

Z la impedancia acústica del medio que rodea a la pared.

Si este medio es el aire, $Z = 415$ rayls, y la ecuación se puede expresar de la forma:

$$R = 20 \cdot \log(M f) - 43 \text{ dB}$$

Hay que añadir que esta relación se cumple siempre y cuando la frecuencia de la onda incidente sea mucho mayor que la de los modos propios de vibración de la pared y la incidencia del sonido sea perpendicular a la pared. En condiciones habituales (campo reverberante) y cuando se realiza una evaluación del aislamiento en tercios de octava, la ecuación que se ajusta mejor es:

$$R = 20 \cdot \log(M f) - 47 \text{ dB}$$

La ley de masas nos indica pues, que el aislamiento en dB es proporcional al cuadrado de la masa por unidad de superficie del tabique (M) y también al cuadrado de la frecuencia (f). Es decir, el aislamiento aumenta con la densidad superficial del tabique y si la frecuencia del sonido es mayor. Según la ecuación, si duplicamos la masa de la pared, el aislamiento aumentará en 6 dB y del mismo modo, dado un panel de masa M, su aislamiento se incrementará en 6 dB al duplicar la frecuencia.

En la práctica no es fácil encontrar una partición que cumpla con exactitud la ley de masas, ni siquiera para un rango de frecuencias, sobre todo si el cerramiento es un elemento incorporado a un edificio y está conectado al resto mediante otros elementos con cierta rigidez. Así, existen tres zonas en las que el aislamiento acústico está gobernado por diferentes factores:

- Zona de dominio de la elasticidad ($f < f_0$), correspondiente a muy bajas frecuencias donde el aislamiento desciende hasta f_0 , frecuencia de resonancia del primer modo vibratorio de la partición, donde es prácticamente nulo.
- Zona de dominio de la masa, ($f_0 < f < f_c$), donde el aislamiento es gobernado por la ley de masas, (aumento de 6 dB/octava).
- Zona de dominio del amortiguamiento interno o coincidencia, ($f > f_c$), donde el aislamiento baja considerablemente hasta llegar a f_c para después volver a crecer de modo progresivo a razón de unos 10 dB/octava.

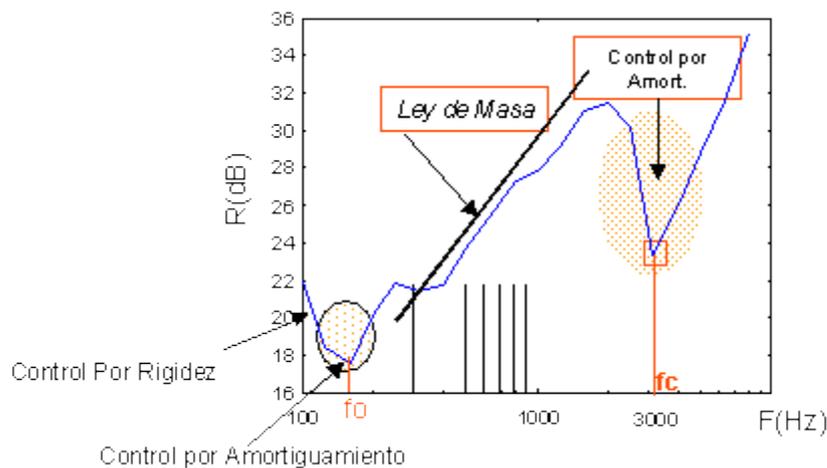


Imagen N° 9: Aislamiento a ruido aéreo en condiciones de laboratorio de un panel de yeso de 10 mm de espesor ($M=7.5 \text{ Kg/m}^2$).

En la imagen N°9 se muestran las tres zonas de aislamiento dependiendo de la frecuencia de la onda acústica incidente, tomando como referencia la curva de aislamiento de un panel de cartón yeso de 10 mm de espesor (7.5 Kg por metro cuadrado).

Además se muestra la línea correspondiente a la ley de la masa teórica que como se puede ver está ligeramente por encima de la experimental, incluso teniendo en cuenta que el ensayo de este panel se realizó en condiciones de laboratorio. Pueden observarse dos mínimos correspondientes a la frecuencia de resonancia y la zona de coincidencia. Cuanto mayor sea el amortiguamiento de la estructura en estas frecuencias, menor será la pérdida de aislamiento en estos mínimos.

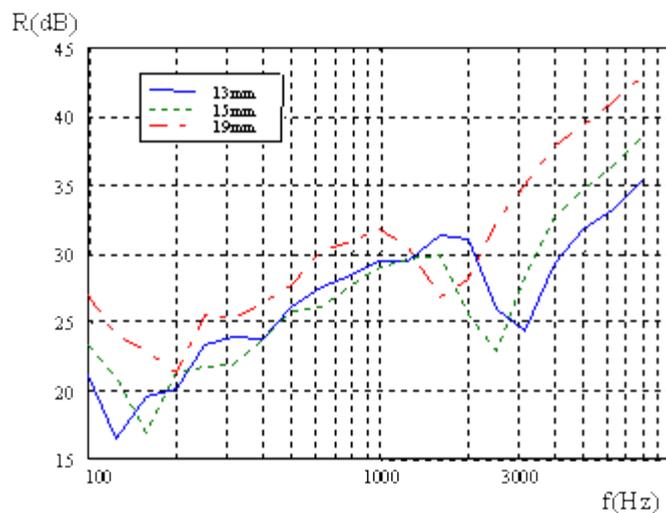


Imagen N° 10: aislamiento a ruido aéreo en condiciones de laboratorio de varios paneles de yeso de 13, 15, 19 mm de espesor ($M=9.8, 11.9$ Y 16.8 Kg/m²).

A modo de ejemplo, la imagen N°10 permite comparar algunos resultados de ensayos en laboratorio de paneles de yeso, donde se puede observar como a medida que aumenta el espesor, la frecuencia de coincidencia disminuye, presentando problemas de aislamiento en frecuencias medias.

Puede comprobarse como la frecuencia de coincidencia de un panel de 13 mm de espesor (línea continua azul) se sitúa en la banda de 3150 Hz, mientras que para un panel de 19 mm de espesor (línea discontinua roja) esta frecuencia baja hasta 1600 Hz.

Podemos concluir que la ley de masas para paneles simples proporciona una descripción orientativa del comportamiento de particiones simples, pero efectos de resonancia y el propio montaje de los paneles en condiciones no ideales implican que en la práctica estos valores estimados no se alcancen.

6.2.2 Aislamiento de paredes múltiples

Como se ha comentado en el apartado anterior, podemos mejorar el aislamiento de un paramento en 6 dB cada vez que duplicamos su masa, esto implicaría que para conseguir un incremento de 20 dB tendríamos que multiplicar la masa superficial por 10. Esto obviamente es inviable tanto por razones de diseño como económicas. Además de este incremento bruto, los efectos de resonancia y coincidencia comentados en el apartado anterior,

degradan de forma significativa el aislamiento de una partición simple en las bandas afectadas.

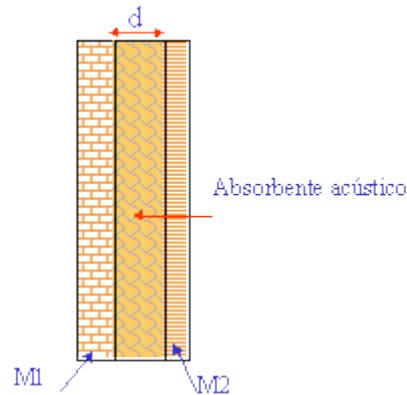


Imagen N°11. Pared de dos hojas con M1 Y M2 Kg/m2 SEPARADAS una distancia d (cm).

Una solución a este problema es la utilización de paredes múltiples. Supongamos una pared de masa superficial M, y otra de dos hojas separadas una distancia d, de masas M1 y M2 tales que $M_1 + M_2 = M$ (Imagen N°11). De forma análoga al caso de los paneles simples, podemos distinguir varias zonas en función de la frecuencia, separadas por frecuencias de resonancia que en el caso de paredes múltiples son:

- La frecuencia, f_0 , de resonancia del sistema Masa-Muelle-Masa (pared-cavidad-pared). Esta frecuencia dependerá de las masas de ambas hojas, de la distancia de separación entre ambas y de si existe algún tipo de absorbente acústico en el espacio entre ellas.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K \frac{M_1 + M_2}{M_1 \cdot M_2}} \quad (\text{Hz})$$

Donde K, es la rigidez del medio separador en N/m³ y M1 y M2 son las masas por unidad de superficie de las hojas de la pared doble. Cuando el medio separador es el aire, esta frecuencia se puede calcular a partir de la distancia separadora entre las hojas:

$$f_0 = \frac{615}{\sqrt{d}} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \quad (\text{Hz})$$

Donde la distancia d debe expresarse en centímetros. Puede observarse como esta frecuencia es menor cuanto mayor sea la masa y la distancia entre paredes.

- Las frecuencias de resonancia de la cavidad. Existen múltiples frecuencias de resonancia de la cavidad, que se pueden calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$f_c = n \frac{c}{2d} \quad (\text{Hz})$$

Dónde:

n toma valores enteros (1,2,3...);

f_c frecuencia en Hz;

d , distancia entre capas en metros y

c la velocidad del sonido en m/s (330 m/s).

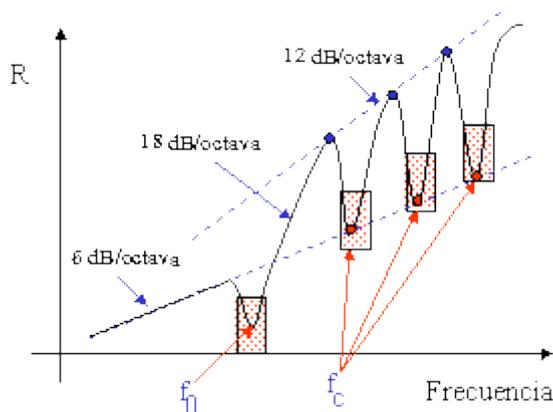


Imagen N°12. Aislamiento a ruido aéreo de una pared de dos hojas con cámara de aire.

La imagen N °12 permite apreciar el efecto de las resonancias mencionadas y además distinguir las diversas zonas de comportamiento de la pared doble:

- Frecuencias inferiores a f_0 . El panel se comporta exactamente igual a un panel simple de masa igual a la suma de las masas de ambas hojas. Interesa por tanto que esta frecuencia sea lo más baja posible conseguir mantener el mínimo de aislamiento en una frecuencia en la que el ruido transmitido no produzca molestia. Se recomienda en concreto que esta frecuencia se sitúe por debajo de los 60 Hz. Puede

calcularse la separación requerida para que se cumpla este requisito de forma aproximada:

$$d > 105 \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \quad (cm)$$

- b. Frecuencias entre f_0 y la primera resonancia de la cavidad. Esta es la zona donde realmente presenta ventajas la utilización de una pared doble, permitiendo conseguir un incremento de aislamiento de 18 dB cada vez que duplicamos la frecuencia. Puede estimarse el valor del aislamiento en este margen de frecuencias a partir de la expresión:

$$R_d = 20 \cdot \log \left(\frac{M_1 \cdot M_2}{2Z_0 c} (2\pi f)^3 \right) \quad (dB)$$

Dónde:

$Z_0=415$ y $c=330$ m/s.

Estos valores teóricos son orientativos. En la práctica deben seguirse una serie de recomendaciones para acercarse a estos valores, debido a acoplamientos vibratorios entre ambas caras y a la posible influencia de las frecuencias de coincidencia de cada una de las hojas por separado. En apartados posteriores sobre consideraciones prácticas de aislamiento se realizarán algunas indicaciones al respecto.

- c. Zona controlada por las resonancias de la cavidad. En esta zona el aislamiento se degrada considerablemente, debido al acoplamiento entre las dos hojas a través del efecto de las resonancias de la cavidad. En las frecuencias de resonancia, f_c , el aislamiento toma el valor que se obtiene al aplicar la ley de masas para paredes simples (ver imagen N°12). Este defecto puede evitarse introduciendo un absorbente acústico en la cavidad, de forma que atenuará la energía acústica producida en las resonancias de la cavidad.

El efecto se ilustra en la imagen N°13, donde se ha intentado reflejar la mejora de aislamiento conseguida en los mínimos producidos por las resonancias de la cavidad.

Muy a menudo en la práctica siempre existe una conexión entre las dos láminas que forman la pared. Esto provoca un puente sonoro que disminuye el aislamiento enormemente pues hace que el conjunto funcione como una pared simple. En este caso, para paredes pesadas se utilizarán acoplamientos ligeros y blandos. En el caso de paredes ligeras, al contrario, es decir acoplamientos pesados y rígidos.

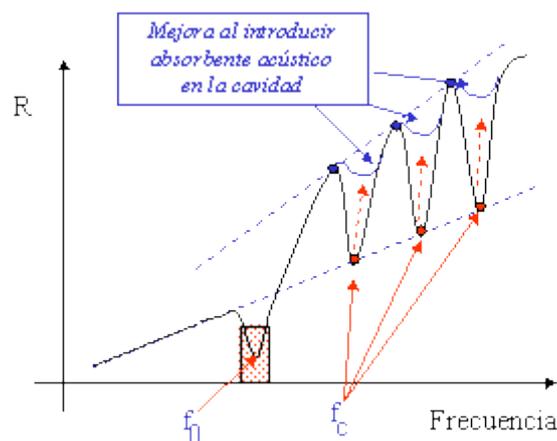


Imagen N°13. Efecto del absorbente acústico en el aislamiento de un panel doble.

6.2.3. Aislamiento de paredes mixtas

En las particiones que separan dos recintos o estancias como pueden ser un tabique, un forjado o una fachada, es probable que existan diferentes elementos que la compongan. Por ejemplo en una fachada, lo normal es que además del muro que la forma contemos con una ventana, puerta, etc.

La Norma Básica de la Edificación, CA-88, suministra un ábaco que permite hallar el aislamiento global, A_g , en estos casos. Además este parámetro A_g , se puede calcular a partir de la ecuación:

$$A_g = 10 \cdot \log \frac{\sum S_i}{\sum 10^{\frac{A_i}{10}}}$$

Dónde:

Si es la superficie del elemento i que compone la partición y A_i el aislamiento del elemento por separado.

6.3 La problemática del aislamiento. Aspectos prácticos.

6.3.1. Vías de transmisión. Transmisión aérea y transmisión por flancos.

El sonido que penetra en un recinto puede hacerlo por medio de diferentes caminos, los cuales se pueden dividir en dos grupos dependiendo de la naturaleza de la transmisión:

- **Vía aérea:** En este tipo de transmisión, el sonido se propaga transversalmente a la partición (pared, fachada o forjado), sin que exista propagación longitudinal a través de la estructura. El medio aéreo en el que se origina el ruido pone en vibración al elemento separador y éste a su vez radia la energía acústica adquirida al medio aéreo receptor. Incluye las transmisiones por grietas o poros en las paredes, conductos de ventilación o por medio de vibraciones elásticas de la pared de separación entre los recintos emisor y receptor.
- **Vía Estructural:** En este grupo podemos distinguir:
 - La transmisión por ruido de impacto, que ocurre cuando se produce una percusión directa de la estructura, por golpeo o roce, convirtiéndose ésta en transmisor de sonido.
 - La transmisión por flancos, consistente en vibraciones longitudinales elásticas de paredes no adyacentes y radiadas al recinto receptor por las paredes laterales al propagarse por el espesor de éstas. Cualquier sonido originado en el medio aéreo puede provocar vibraciones en la estructura que pueden ser transmitidas a otros recintos no adyacentes al emisor, siendo éste uno de los problemas más difíciles de controlar.

Las distintas vías por las que se puede propagar el sonido en un edificio son:

- a) La vía aérea (flechas amarillas), supone el paso directo a través de la partición, como se ha comentado anteriormente.
- b) Las vías representadas en color verde indican la transmisión estructural producida por la excitación directa del forjado o una pared divisoria (altavoces directamente apoyados en el suelo o en contacto rígido con una pared).
- c) La "transmisión por flancos" se ha representado por una flecha que cambia del color amarillo (excitación aérea) al verde (excitación estructural) indicando así que el campo acústico puede poner en vibración a la estructura, y a partir de este momento la propagación se realiza hacia todo el edificio de forma estructural, resultando de poca ayuda el haber diseñado forjados de gran aislamiento. Podríamos decir que la transmisión estructural se "salta" los diseños realizados para controlar la transmisión vía aérea.

El resto de las vías indicadas reflejan problemas que suelen presentarse por falta de previsión:

- a) Transmisión a través de puertas y ventanas (color rojo), por desajustes en el cierre o por haber colocado un elemento poco aislante acústicamente. Esta transmisión se realiza vía aérea. Aunque se haya elegido una fachada muy aislante acústicamente, en una partición mixta (muro o fachada con puertas o ventanas) el aislamiento resultante va a venir determinado por el elemento más débil, y no suele superar en 10 dB el valor de este elemento, por ejemplo: si sobre un muro que podría aislar 45 dB se coloca una ventana cuyo aislamiento sea del orden de 25 dB, el aislamiento resultante será a lo sumo de 35 dB.
- b) Transmisión a través de conductos de ventilación (azul). Muchas veces se interconecta recintos directamente a través de los conductos de ventilación. El sonido a través de estos conductos se propaga con muy poca atenuación. Es muy habitual que en edificios se degrade el aislamiento entre viviendas debido al diseño de los conductos de ventilación de los cuartos de baño (conducto común para todas las viviendas de la misma "letra").
- c) Transmisión por puentes acústicos. Ocurre cuando se conecta rígidamente las dos hojas de una pared doble. Puede ocurrir por

descuido o por un paso de cables o tuberías incorrecto. Un paso de cables perforando el muro, sin cuidado supone una degradación apreciable del aislamiento en alta frecuencia.

Es muy importante en cada caso realizar una evaluación global de todas las posibles vías de transmisión. En apartados posteriores se comentará como detectar alguno de los problemas a partir de las curvas de aislamiento obtenidas de las medidas.

6.3.2. Aislamiento acústico aparente. Diferencia entre r y r' .

Cuando se mide el aislamiento acústico a ruido aéreo de una partición cualquiera en el laboratorio, utilizando la magnitud normalizada, R , sabemos que va a estar incluido en dicha medida únicamente el aislamiento al ruido vía aérea. Lo que parece evidente no lo es tanto si consideramos que un laboratorio diseñado a tal efecto, lo está de manera que no se permita la transmisión de sonido por otras vías. Tanto su diseño como la construcción supone un gasto elevadísimo, imposible de llevar a cabo en la mayoría de las construcciones reales.

Si medimos el aislamiento a ruido aéreo que produce una partición en una construcción cualquiera, in situ, tendremos pues una componente debida a otras vías de transmisión, sobre todo la de transmisión por flancos, que no podremos diferenciar ni separar. Así, una misma estructura de un mismo material, no proporciona un mismo resultado si la medida se realiza en el laboratorio o es llevada a cabo en la construcción real. Es por todo esto que ahora utilizemos la magnitud de Aislamiento Acústico Aparente, R' para medidas in situ:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{A}\right)$$

Como se puede ver, la R' se va a evaluar de la misma manera que R , si bien para una misma partición, el valor de R (laboratorio), proporcionado por el fabricante del material, será mayor que el valor de R' (in situ), correspondiente al montaje en una construcción real, debido a la influencia de las vías de transmisión comentadas anteriormente, que en laboratorios están controladas.

6.3.3 Efectos de grietas y puentes acústicos.

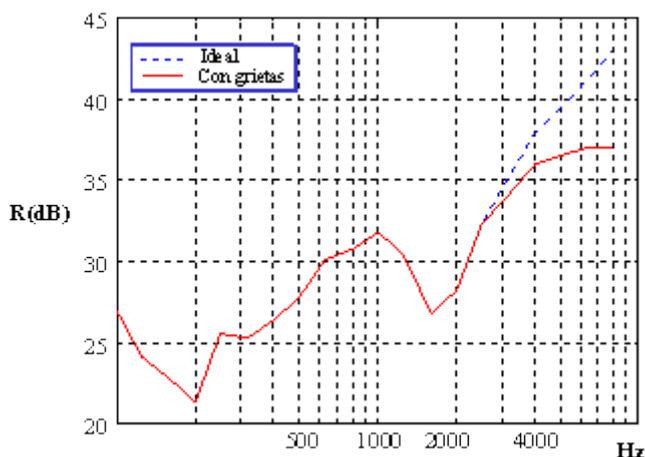


Imagen N°14. Efectos de las grietas en el aislamiento de un panel de yeso de 19 mm.

Algunos problemas de transmisión sonora producidos por un montaje incorrecto o por la aparición de grietas, se pueden detectar mediante la interpretación de la curva de aislamiento acústico a ruido aéreo medida "in-situ".

Anteriormente, se ha representado como se refleja el comportamiento "ideal" de paneles simples y múltiples respectivamente. La imagen N°14 muestra la curva de aislamiento obtenida de un panel de yeso de 19 mm en el que no se ha tenido cuidado al proceder al sellado de los pequeños espacios que quedan entre el panel y el techo y entre paneles adyacentes. Se puede observar un "achatación" en la zona de altas frecuencias, donde se llegan a perder casi 10 dB a 8000 Hz. Procediendo al sellado con pasta de las ranuras, se observa cómo este comportamiento se corrige.

Cualquier defecto de construcción, puentes acústicos, etc. va a verse reflejado en la curva de aislamiento como un achatamiento con respecto al comportamiento teórico descrito en los apartados anteriores. Una mala instalación implicará desaprovechar las capacidades aislantes de la estructura por la que se ha optado.

7

APLICACIÓN DE LA TEORÍA: EJEMPLOS DE CÁLCULOS

Como aplicación práctica de los conceptos fundamentales del sonido se han desarrollado una serie de ejemplos de cálculo utilizando las ecuaciones de la NBA-CA-88 Norma básica sobre Condiciones Acústicas en los Edificios.

Se ha procurado mostrar ejemplos simplificados representativos del comportamiento del sonido en casos normales de urbanismo y edificación, si bien hay que advertir que se trata de una estimación aproximada a lo que ocurre en el mundo real porque se han aplicado algunas ecuaciones empíricas que no consideran todas las variables e ignoran algunos fenómenos colaterales.

7.1. NIVELES ACÚSTICOS

Potencia acústica

Supongamos que la bocina de un automóvil tiene una potencia acústica W de $0.001 \text{ W} = 10^{-3} \text{ W}$. En acústica, la potencia mínima de referencia es $P_0 = 10^{-12} \text{ W} = 1 \text{ pW}$ (picovatío). La potencia de la bocina también se puede expresar en picovatios: $W = 10^{-3} \text{ W} = 10^9 \text{ pW}$. (Martín, 2003).

Intensidad acústica

Si la potencia sonora se difunde en todas direcciones, a 1m de distancia atraviesa el área de una esfera de superficie $S = 4\pi r^2 = 12.56 \text{ m}^2$, y la intensidad acústica será (Martín, 2003):

$$I = P / S = 10^{-3} \text{ W} / 12.56 \text{ m}^2 = 7.96 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$I = 7.96 \times 10^7 \text{ pW/m}^2$$

Nivel de intensidad acústica

Se calcula mediante la siguiente expresión, donde I es la intensidad acústica considerada, en W/m^2 , y I_0 es la intensidad acústica de referencia, que se establece en $10^{-12} W/m^2$. (Martín, 2003).

$$L = 10 \text{ Log } (I / I_0) = 10 \text{ Log } (7.96 \times 10^{-5} / 10^{-12})$$

$$L = 10 \text{ Log } (7.96 \times 10^7) = 10 \times 7.90 = \mathbf{79 \text{ dB}}$$

El nivel se puede calcular directamente con la intensidad expresada en picovatios: $L = 10 \text{ Log } (I \text{ pW}/m^2)$.

Ley de la distancia

Si $L_1 = 79 \text{ dB}$ es el nivel de intensidad a una distancia $d_1 = 1 \text{ m}$, y un observador se encuentra en campo abierto a una distancia $d_2 = 8 \text{ m}$, el nivel resultante L_2 vendrá dado por la siguiente expresión (Martín, 2003):

$$L_2 = L_1 + 20 \text{ Log } (d_1 / d_2) = 79 + 20 \text{ Log } (1/8)$$

$$L_2 = 79 - 18 = \mathbf{61 \text{ dB}}$$

Se puede comprobar que cuando la fuente de sonido está en campo abierto el nivel sonoro disminuye 6 dB cada vez que se duplica la distancia. En este caso, la distancia se ha duplicado 3 veces y el nivel de intensidad ha disminuido $3 \times 6 = 18 \text{ dB}$. (Martín, 2003).

Composición de niveles

Si el automóvil hace sonar simultáneamente una sirena que produce un nivel de intensidad $L_3 = 70 \text{ dB}$ a 8 m de distancia será preciso “componer” ambos niveles mediante la suma de sus intensidades. El nivel resultante L_4 vendrá dado por la expresión (Martín, 2003):

$$L_4 = 10 \text{ Log } (\sum 10^{(L_i/10)}) = 10 \text{ Log } (10^{(L_3/10)} + 10^{(L_4/10)})$$

$$L_4 = 10 \text{ Log } (1.26 \times 10^6 + 1 \times 10^7) = 10 \text{ Log } (1.126 \times 10^7)$$

$$L_4 = 10 \times 7.05 = \mathbf{70.5 \text{ dB}}$$

El resultado muestra que si un nivel es inferior en 10 dB a otro, el nivel compuesto apenas incrementará el nivel más alto. En la práctica se puede despreciar el más débil. (Martín, 2003).

Frecuencia y nivel ponderado A (dBA)

PROGRAMA DE ESTUDIOS EN CALIDAD, AMBIENTE Y METROLOGÍA

Para adaptar el nivel de intensidad (dB) a la sensibilidad del oído humano se aplican unas correcciones que permiten obtener el nivel ponderado **A** (dBA). Para cada frecuencia **f** hay que sumar el nivel (dB) de unas ponderaciones **p(f)** que vienen definidas por los siguientes valores (Martín, 2003):

f (Hz)	p (dB)
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	0
4000	+1,2
8000	0
16000	+1,0

Si la bocina del automóvil produce un nivel de 61 dB con una frecuencia de 500 Hz, el nivel ponderado dBA será:

$$L_{p2} = L_2 + p(f) = 61 - 3.2 = \mathbf{57.2 \text{ dBA}}$$

Igualmente, si la sirena produce un nivel de 70 dB con una frecuencia de 2000 Hz, el nivel ponderado dBA será:

$$L_{p3} = L_3 + p(f) = 70 + 1.2 = \mathbf{71.2 \text{ dBA}}$$

Por último, aplicando la composición de niveles del apartado anterior se obtiene un nivel compuesto ponderado $L_{p4} = \mathbf{71.3 \text{ dBA}}$. Para simplificar, llamamos **nivel acústico dBA** al “nivel de intensidad acústica ponderado A”.

Índices de valoración del ruido de tráfico

Para la valoración del ruido de tráfico u otras fuentes sonoras pueden realizarse un estudio estadístico de sus fluctuaciones. El **Nivel Leq o nivel sonoro continuo equivalente** es uno de los índices más usados, mediante la expresión:

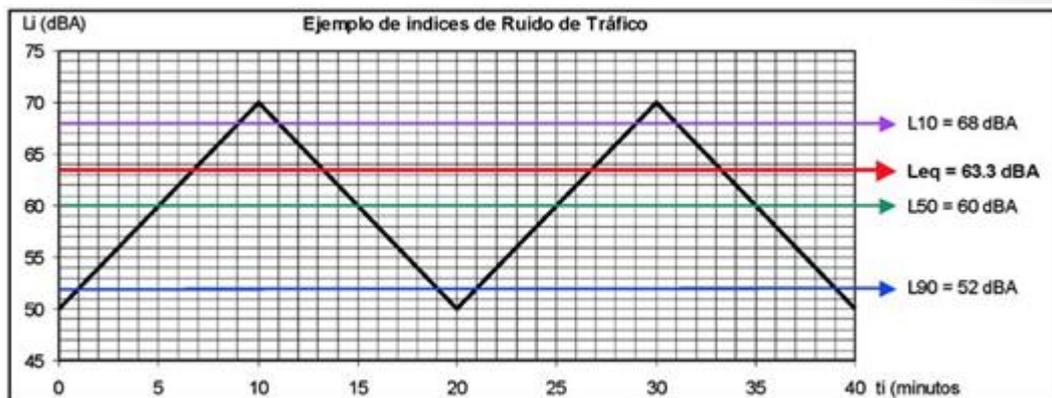
$$\text{Leq} = 10 \text{ Log } ((\sum \text{ti } 10^{\text{Li}/10}) / T) \text{ dBA}$$

Donde, ti es el tiempo de observación durante el cual el nivel sonoro es Li \pm 2,5 dBA

Como ejemplo, (Martín, 2003). si en un periodo (T) de 10 minutos el nivel de ruidos aumenta paulatinamente desde 50 dBA hasta 70 dBA y se miden los niveles medios (Li) de cada minuto (ti), al final de las mediciones resultará un Nivel equivalente **Leq = 63.3** dBA.

Nº medida	Nivel Li dBA	Intensidad $10^{\text{Li}/10}$	Suma $\sum \text{ti} \cdot 10^{\text{Li}/10}$	Media $(\sum \text{ti} \cdot 10^{\text{Li}/10})/T$	Nivel Leq dBA
1	51	125893	125893	125893	51.0
2	53	199526	325419	162709	52.1
3	55	316228	641647	213882	53.3
4	57	501187	1142834	285708	54.6
5	59	794328	1937162	387432	55.9
6	61	1258925	3196087	532681	57.3
7	63	1995262	5191350	741621	58.7
8	65	3162278	8353627	1044203	60.2
9	67	5011872	13365500	1485056	61.7
10	69	7943282	21308782	2130878	63.3

Además, si el nivel acústico aumentara hasta 70 dBA, como el ejemplo, y vuelve a descender hasta 50 dBA, con una gráfica continua en diente de sierra se podrían determinar los siguientes índices de ruido:



Nivel Pico = 70 dBA (nivel sonoro máximo durante el todo el tiempo)

Nivel L_{10} = 68 dBA (nivel sonoro que se sobrepasa durante el 10% del tiempo)

Nivel L_{50} = 60 dBA (nivel sonoro que se sobrepasa durante el 50% del tiempo)

Nivel L_{90} = 52 dBA (nivel sonoro que se sobrepasa durante el 90% del tiempo)

Nivel L_{eq} = 63.3 dBA (nivel sonoro de la intensidad media del periodo)

7.2 AISLAMIENTO ACÚSTICO

Aislamiento acústico bruto de un local respecto a otro (dBA)

Si dos habitaciones están separadas por un tabique u otro elemento separador y se mide el nivel acústico $L_1 = 75$ dBA del local con una fuente de sonido y el nivel $L_2 = 40$ dBA del local receptor, se puede calcular el aislamiento acústico bruto de los dos locales mediante la expresión (Martín, 2003):

$$D = L_1 - L_2 = 75 - 40 = 35 \text{ dBA}$$

Este ensayo se suele realizar mediante un sonómetro con dos micrófonos, que miden simultáneamente los niveles de ambas habitaciones y una fuente de sonido lo suficientemente potente como para desprestigiar otras fuentes.

Aislamiento acústico normalizado a ruido aéreo

El nivel del local receptor depende, además del aislamiento acústico del tabique, de la superficie S del elemento separador (m^2) y de la absorción A (m^2) del recinto receptor. La absorción A se calcula mediante la suma de cada una de las superficies del local receptor multiplicadas por su coeficiente α de absorción. (Martín, 2003).

Para estimar de forma objetiva el aislamiento acústico del elemento

separador, independientemente de S y A, se puede calcular el **aislamiento acústico normalizado R** mediante la expresión (Martín, 2003):

$$R = D + 10 \text{ Log } (S/A) = L_1 - L_2 + 10 \text{ Log } (S/A) \text{ dBA}$$

En el caso anterior, si la superficie separadora **S** mide 12m² y la absorción **A** del recinto receptor se estima para una superficie total de 80 m² con una absorción media α de 0.03, resultando $A = 80 \times 0.03 = 2.4 \text{ m}^2$, tendremos:

$$R = D + 10 \text{ Log } (S/A) = 35 + 10 \text{ Log } (12/2.4) = 35 + 7 = \mathbf{42 \text{ dBA}}$$

Reducción del nivel acústico del local receptor

Cada tipo de cerramiento tiene un “aislamiento acústico normalizado R” (dBA) de valor constante, ya que depende de las características constructivas del elemento separador. Por tanto, del ejemplo anterior se puede despejar el nivel acústico del local receptor L_2 , considerando R constante.

$$L_2 = L_1 - R + 10 \text{ Log } (S/A) \text{ dBA}$$

$$L_2 = 75 - 42 + 10 \text{ Log } (12/2.4) = 75 - 42 + 7 = \mathbf{40 \text{ dBA}}$$

Si la superficie S del elemento separador se disminuye a la mitad, $S' = S/2 = 6\text{m}^2$, es evidente que se reducirá el nivel acústico recibido L_2'

$$L_2' = L_1 - R + 10 \text{ Log } (S'/A)$$

$$L_2' = 75 - 42 + 10 \text{ Log } (6/2.4) = 75 - 42 + 4 = \mathbf{37 \text{ dBA}}$$

Si la absorción A de las superficies interiores del local receptor se multiplica por 4, mejorando $\alpha = 0.12$, resulta que $A' = 80 \text{ m}^2 \times 0.12 = 9.6 \text{ m}^2$. Es muy interesante comprobar que también se reduce el nivel acústico recibido L_2

$$L_2'' = L_1 - R + 10 \text{ Log } (S/A')$$

$$L_2'' = 75 - 42 + 10 \text{ Log } (12/9.6) = 75 - 42 + 1 = \mathbf{34 \text{ dBA}}$$

En resumen, el nivel acústico recibido L_2 se puede reducir en 3 dBA cada vez que se reduzca a la mitad la superficie S del elemento separador, o cada vez que se duplique la absorción A acústica del local.

Aislamiento acústico (dBA) de elementos constructivos simples.

Los valores del aislamiento proporcionado por los cerramientos es función casi exclusiva de su masa, siendo aplicables las ecuaciones siguientes que determinan el aislamiento R valorado en dBA, en función de la masa por unidad de superficie m, expresada en kg/m². Como ejemplo estudiamos dos tipos de cerramientos (Martín, 2003):

- **Cerramientos ligeros** ($m < 150 \text{ kg/m}^2$) de tabique de bloque de 9 cm de densidad 1000 Kg/m³ más 2 cm de yeso de densidad 800 kg/m³ :

$$m = 0.09 \times 1000 + 0.02 \times 800 = 106 \text{ kg/m}^2$$

$$R = 16,6 \text{ Log } m + 2 = \mathbf{35.6 \text{ dBA}}$$

- **Cerramientos pesados** ($m > 150 \text{ kg/m}^2$) de fábrica de bloque de 20 cm de densidad 1000 Kg/m³ más 2 cm de enfoscado de densidad 2000 kg/m³ :

$$m = 0.20 \times 1000 + 0.02 \times 2000 = 240 \text{ kg/m}^2$$

$$R = 36,5 \text{ Log } m - 41,5 = \mathbf{45.4 \text{ dBA}}$$

Aislamiento acústico de ventanas y puertas

El aislamiento acústico R de **ventanas** se puede estimar según la estanqueidad de la carpintería y el espesor nominal del vidrio.

Aislamiento acústico

Como ejemplo de aplicación, se muestran los aislamientos de diferentes tipos de carpintería y espesores de vidrio, considerando el espesor de cámara intermedia en vidrio doble y el del plástico en vidrio laminado:

Estanqueidad de carpintería	A-1	A-2	A-3
	Vidrio simple e = 8 mm	< 15	26.5 dBA

	dBA		dBA
Vidrio doble 4 + 10 + 4 mm (e=4)	< 15		27.5
	dBA	22.5 dBA	dBA
Vidrio doble 4 + 16 + 4 mm (e=8)	< 15		31.5
	dBA	26.5 dBA	dBA
Vidrio laminado 4 + 4 (e=8.5)	< 15		34.8
	dBA	29.8 dBA	dBA

Como ejemplo de **puertas simples** se puede estimar el aislamiento acústico **R** considerando una puerta de madera maciza de 35 mm con una masa superficial (m) de 28 Kg/m², según la estanqueidad:

Con juntas de estanqueidad: **R = 16.6 (Log 28) – 8 = 16.0 dBA**

Sin juntas de estanqueidad: **R = 16.6 (Log 28) – 13 = 11.0 dBA**

Aislamiento global a_g de elementos constructivos mixtos.

Un ejemplo sencillo sería la **fachada** de un local con ventana, de áreas $S_c = 9 \text{ m}^2$ y $S_v = 3 \text{ m}^2$ y con un aislamiento acústico de $a_c = 45.4 \text{ dBA}$ y $a_v = 26.5 \text{ dBA}$, correspondientes respectivamente a la parte ciega (fábrica de bloque de 20 cm enfoscado) y a la ventana (clase a-2 con vidrio simple de 8 mm). El aislamiento acústico global **a_g** puede calcularse mediante la expresión (Martín, 2003):

$$a_g = 10 \log \frac{\sum SI}{\sum \frac{SI}{10^{a_i/10}}} = 10 \log \frac{S_c + S_v}{\frac{S_c}{10^{a_c/10}} + \frac{S_v}{10^{a_v/10}}}$$

Esta ecuación es aparentemente compleja de calcular pero con práctica se puede realizar rápidamente con una simple calculadora. El resultado de la ecuación es:

Fachada: **$a_g = 32.36 \text{ dBA}$**

Otro ejemplo sería la **partición interior**, entre una habitación y el pasillo, con $S_c = 7.5 \text{ m}^2$ de tabique con aislamiento $a_c = 35.6 \text{ dBA}$ (fábrica de bloque de 9 cm guarnecida de yeso) y $S_v = 1.5 \text{ m}^2$ de puerta con aislamiento $a_v = 11 \text{ dBA}$ (puerta de 35 mm maciza sin burlete), resultando:

Partición interior: $a_G = 18.7 \text{ dBA}$

Nivel de ruido de impacto normalizado L_n .

Es el nivel de ruido producido por la máquina de impactos, que se describe en la Norma UNE 74-040 84 (6), en el recinto subyacente. Se define mediante la expresión:

$$L_n = L + 10 \text{ Log } (A/10)$$

De donde se deduce:

$$L = L_n - 10 \text{ Log } (A/10)$$

En la práctica, conocido L_n , el nivel directamente medido L se podrá reducir en 3 dBA cada vez que se duplique la absorción A del recinto en m^2 .

Como ejemplo, si se conoce el aislamiento al ruido aéreo $R = 45 \text{ dBA}$ del forjado, el nivel de ruido de impacto se podrá determinar mediante la siguiente ecuación:

$$L_n = 135 - R = 135 - 45 = 90 \text{ dBA}$$

Si se desea limitar el nivel de ruido de impacto a $L_n' = 80 \text{ dBA}$ que prescribe la Norma, se debe aumentar el aislamiento hasta $R' = 55 \text{ dBA}$, correspondiente a una masa superficial de 440 Kg/m^2 . También se puede añadir una mejora ΔL_n a ruido de impacto de magnitud:

$$\Delta L_n = L_n - L_n' = 90 - 80 = 10 \text{ dBA}$$

Esta mejora $\Delta L_n = 10 \text{ dBA}$ la puede proporcionar, por ejemplo, un pavimento de **parquet de corcho**.

**** Nota aclaratoria:** considerando que la Norma CA-88 calcula a_c y a_v mediante el procedimiento de cálculo del aislamiento normalizado R , se han estimado equivalentes a efectos de este ejemplo.

7.3 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Absorción acústica

La absorción acústica de un local se puede calcular conociendo el

coeficiente de absorción media de las superficies interiores. Por ejemplo, con una habitación de 4 x 4 m y de 3 m de altura y con un coeficiente de absorción media $\alpha_m = 0.03$ (característico de superficies duras) se puede calcular el valor de la absorción **A** de la siguiente forma (Martín, 2003):

$$S_{\text{suelo}} = 4 \times 4 = 16 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{techo}} = 4 \times 4 = 16 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{paredes}} = 4 \times 4 \times 3 = 48 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{S_{\text{total}} = 80 \text{ m}^2}$$

$$\mathbf{A = \alpha_m \times S = 0.03 \times 80 = 2.4 \text{ m}^2}$$

Si los coeficientes de absorción de las superficies son diferentes habrá que aplicar un cálculo más detallado. Como variante del ejemplo anterior, si el techo estuviera revestido de un panel absorbente de $\alpha = 0.60$, la absorción total sería (Martín, 2003):

$$\mathbf{A' = \sum \alpha_i S_i}$$

$$A' = 16 \times 0.03 + 16 \times 0.60 + 48 \times 0.03 = 0.48 + 9.6 + 1.44 = \mathbf{11.52 \text{ m}^2}$$

Tiempo de reverberación. En el ejemplo anterior, el tiempo de reverberación puede calcularse con cierta aproximación con la fórmula de Sabine, mediante la expresión:

$$\mathbf{T = 0.163 (V / A) \text{ seg}}$$

Volumen del local: $V = 4 \times 4 \times 3 = 48 \text{ m}^3$ Absorción del local: $A = 2.4 \text{ m}^2$
(con $\alpha_m = 0.03$)

$$\mathbf{T = 0.163 (V / A) = 0.163 (48 / 2.4) = 3.26 \text{ seg}}$$

Evidentemente, este tiempo es excesivo para una habitación. En el segundo ejemplo anterior, con techo absorbente y $A' = 11.52 \text{ m}^2$ el resultado será mucho más adecuado:

$$\mathbf{T = 0.163 (48 / 11.52) = 0.68 \text{ seg}}$$

**** Notas relativas al tiempo de reverberación:**

1. Las superficies absorbentes tienen diferentes coeficientes α para cada frecuencia, y por consiguiente, **diferentes tiempos de reverberación** para sonidos graves o agudos. Para casos generales se puede utilizar el coeficiente de absorción medio para una frecuencia media (generalmente 500 Hz), pero en salas de audición se debe analizar el tiempo de reverberación para las principales frecuencias (**125, 250, 500, 1000, 2000** y 4000 Hz), e incluso para 1/3 de octava.

2. Se deben considerar **todas las superficie absorbentes** en el interior de un local, como el mobiliario fijo (butacas), la decoración (cortinas) o los ocupantes. La absorción A de las personas se calcula por $\text{m}^2/\text{persona}$. Como ejemplo, 20 personas con $\alpha = 0.37$ aportan $A = 7.4 \text{ m}^2$, que hay que añadir a la absorción del local.

8

RESPUESTAS DE EJERCICIOS

Problemas a desarrollar en las clases.

9

BIBLIOGRAFIA

Igua, Yuri. (2005). Diseño de aislamiento y acondicionamiento acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la emisora Kennedy. Proyecto de Grado, Universidad de San Buenaventura, Colombia. Recuperado el 12 de octubre del 2015, de

https://arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_354.pdf

Martín, Manuel. (2003). Manual del Ruido. Calidad Ambiental en la Edificación para Las Palmas de Gran Canaria, Islas Canarias, España. Recuperado el 15 de noviembre del 2015 de

<http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/icaro/Manual-4-RUIDO.pdf>

Pérez, Antonio, (2001). Materiales Absorbentes. Universidad de Córdoba. Recuperado el 23 de noviembre de

[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(9\)%20Control%20por%20absorcion/materiales%20absorbentes.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(9)%20Control%20por%20absorcion/materiales%20absorbentes.htm)

SINTEC, (s.f.). Conceptos fundamentales del sonido. Madrid, España. Recuperado el 20 de diciembre del 2015 de

<http://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf>

Universidad de Vigo, (s.f.). Curso de Prevención y Control de la Contaminación Acústica. Recuperado el 23 de noviembre de

http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo_dos_c.htm

10 LINKS Y PÁGINAS DE INTERÉS

PROSERSA

Planes de confinamiento y otros servicios relacionados

TEL.(506) 2283-8333

EMAIL: prosera@cfia.or.cr

<http://proseraconsultores.com/confinamiento.php>

Video: Diseño Aislamiento Acústico

<https://www.youtube.com/watch?v=lgvVFA-kLE0>

Software para el cálculo del aislamiento acústico

https://www.youtube.com/watch?v=TYNXZPxUajo&list=PLm-61GwZ6QNTb9iKPppQ_wKhI8AsxJ5Y