



JORNADAS NACIONALES DE ACUSTICA

Zaragoza, Abril 1989

ABSORCION Y AISLAMIENTO ACUSTICO

ANTONIO PEREZ-LOPEZ

FISICO.- DIRECTOR DE AISLAMIENTOS RYME, S.A.
Grupo Rheinhold & Mahla
c/Baeza, nº 11 - 28002 - MADRID

INTRODUCCION

En esta ponencia se desarrollarán los principales conceptos y aplicaciones de la Absorción y Aislamiento Acústico, fenómenos básicos en la Acústica Aplicada y en la Tecnología del Control del Ruido.

1.- ABSORCION SONORA

La absorción sonora por el aire es debida a la acción molecular y viscosidad del mismo, siendo importante solo a altas frecuencias y para grandes distancias.

La absorción sonora en el interior de un recinto es debida fundamentalmente a la transferencia directa de la energía acústica en energía calorífica por los procesos de fricción y amortiguamiento que se producen en el interior de los materiales, llamados absorbentes. También la energía sonora se "disipa" a través de los huecos como son las ventanas.

Coefficiente de absorción sonora (α) Este coeficiente define las propiedades de un material y es la relación entre la energía absorbida y la energía incidente. Es función de la frecuencia del sonido y del ángulo de incidencia.

Cálculo matemático de α

Sean dos medios de impedancia acústicas Z_1 y Z_2 . Cuando la onda que se propaga en el medio 1 incide sobre el medio 2, en ambos lados de la superficie las velocidades y las presiones son iguales. El factor R de reflexión es:

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

El coeficiente de reflexión es:

$$\alpha_r = R^2 = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(P_r)^2}{(P_i)^2} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

La energía no reflejada es la energía absorbida, luego el coeficiente de absorción α (para incidencia perpendicular) es:

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \alpha_r = 1 - \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Para el caso de absorción total, $\alpha = 1$, luego $Z_1 = Z_2$. Si, como suele ser el caso, el espesor del material Z no es infinito y parte de la energía incidente pasa a través del mismo, la energía transmitida permite definir un coeficiente de transmisión α_t .

$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{I_i - I_r - I_d}{I_i} = 1 - \alpha_r - \alpha_d$$

designándose con el subíndice d la energía disipada en el interior del material por el efecto de la absorción.

Absorción equivalente.- La absorción de un material es el producto de su coeficiente de absorción por la superficie del material S . Una unidad de absorción, un Sabine MKS, corresponde a la absorción de una ventana abierta de superficie 1 m^2 .

Al depender la absorción acústica de un material ó estructura del ángulo de incidencia de las ondas acústicas, se utilizará un coeficiente de absorción medio, definido como el cociente de las energías absorbidas e incidente para un campo difuso, es decir, con incidencia en todas las direcciones, que se pueden medir en cámaras reverberantes, en condiciones de laboratorio. Este coeficiente se llama α_s coeficiente de absorción Sabine, y se calcula a cada frecuencia.

En el caso de un recinto, se define un coeficiente de absorción medio $\bar{\alpha}_s$ como el cociente que multiplicado por el área total de las superficies interiores del recinto dará la misma absorción total que la suma de los coeficientes parciales de superficies multiplicados por las áreas correspondientes.

$$\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n = \bar{\alpha}_s \sum_i^n S_i = A \text{ (m}^2\text{)}$$

Siendo A el área equivalente de una superficie con absorción unidad.

Otras estructuras, definidas por ejemplo, por un volumen, puede añadir unidades equivalentes de absorción.

2.- PROPAGACION DEL SONIDO

La propagación del sonido al aire libre puede ser influenciada por varios factores, durante su recorrido desde la fuente sonora al receptor, como son:

2.1.- Atenuación con la distancia

Una fuente sonora "puntual" con radiación omnidireccional de potencia W , da lugar a una intensidad sonora, I , a una distancia r ,

Radiación esférica.- $I = W / 4 \pi r^2$ (W/m^2)

Radiación semiesférica.- $I = W / 2 \pi r^2$ (W/m^2)

Radiación semicilíndrica.- $I = W / \pi r l$ (W/m^2)

Expresando la atenuación con la distancia en niveles sonoros:

$$L_I = L_0 - 20 \log r$$

expresión que resume la conocida Ley del inverso del cuadro de la distancia, según la cual el nivel sonoro se reduce 6 dB cuando se dobla la distancia del observador a la fuente sonora.

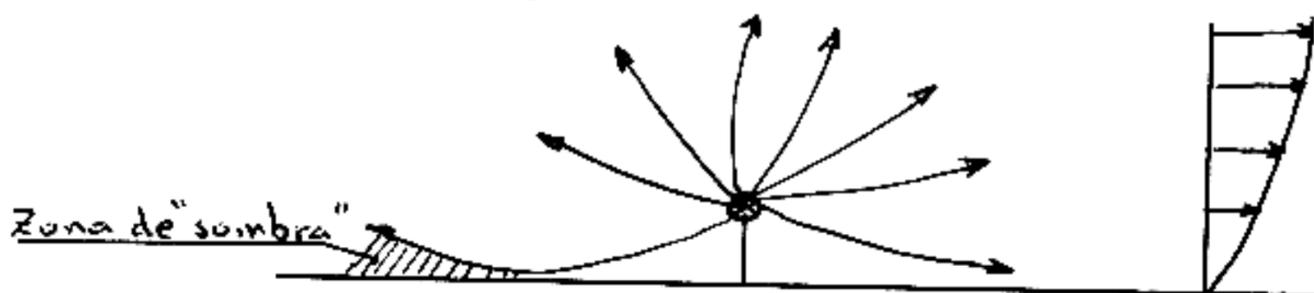
Aunque, en el caso de una línea de tráfico ó un tren, que radia el sonido como medio cilíndrico, la atenuación al doblar la distancia es de 3 dB, según:

$$L_I = L_0 - 10 \log r$$

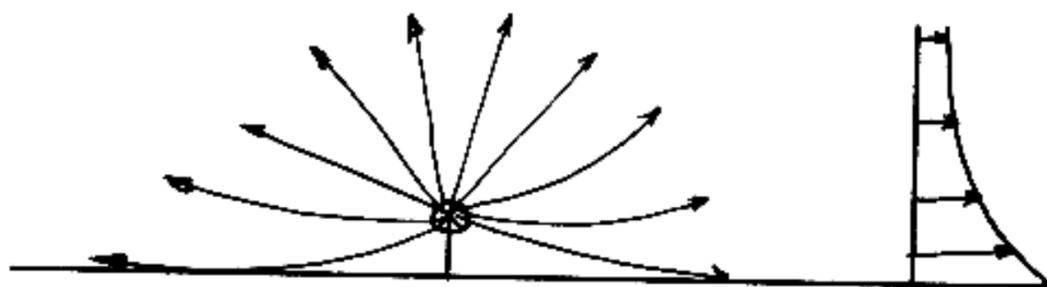
2.2.- Variación de las ondas sonoras con el viento y la temperatura.- (Fig. 1).

Viento.- El gradiente de viento es debido a la reducción de la velocidad del aire con su fricción en la superficie de la tierra, y su influencia sobre la propagación del sonido respecto a la tierra, es resultado de la suma de la velocidad del sonido más la velocidad del viento.

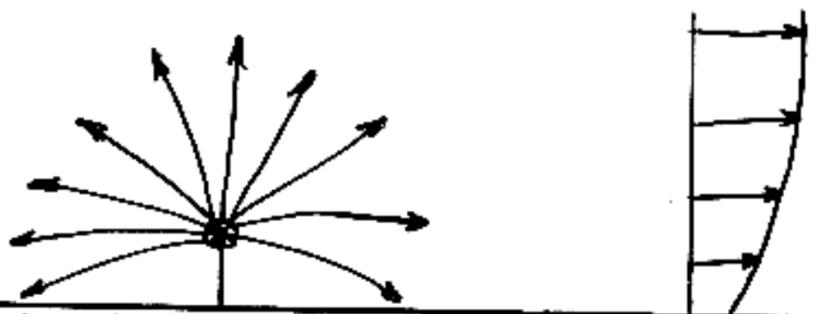
En contra del viento la velocidad total aumenta con la altura sobre la superficie, y da lugar a un incremento de nivel sonoro en puntos lejanos a la fuente.



Efecto del gradiente del viento



Efecto del gradiente de temperatura: grad. negativo (durante el día)



Efecto del gradiente de temperatura: grad. positivo (durante la noche)

Por el contrario, el sonido propagado a favor del viento, decrece su velocidad con la altura y las ondas se curvan hacia arriba, dando lugar a zonas de sombra.

Temperatura.- El efecto del gradiente de temperatura es debido a la variación de la velocidad del sonido con la temperatura. Un gradiente negativo, como ocurre en un día soleado con la tierra caliente, da lugar a una reducción de la velocidad con la altura, y por lo tanto, las ondas se curvan hacia arriba.

En una noche fría, un gradiente positivo puede dar lugar a un aumento de velocidad con la altura, y a una curvatura de las ondas hacia la tierra. Las atenuaciones debidas al viento y al gradiente de temperatura son del orden de 5dB máximo.

Conviene, a la hora de hacer los cálculos, tener en cuenta los efectos del gradiente térmico y la velocidad del viento.

2.3.- Absorción del aire y suelo

La absorción del sonido en el aire es función de la temperatura, humedad relativa y frecuencia, y es significativa para las altas frecuencias, a partir de 1.000 Hz.

<u>Frecuencia (Hz)</u>	<u>ABSORCION DEL AIRE - 20°C - 60% H.R.</u>	
	<u>Atenuación (dB/m)</u>	
1.000	0.003	
2.000	0,008	
4.000	0.025	
8.000	0.083	

La absorción del sonido por la superficie de la tierra, afecta a las ondas que se propagan cerca de ella, en función de la superficie y de la frecuencia.

El efecto del asfalto u hormigón es despreciable, pudiendo ser considerado apreciable la absorción por el césped ó árboles de hojas perennes.

<u>Frecuencia (Hz)</u>	<u>ATENUACION SUPERFICIAL (dB/m)</u>			
	<u>Césped fino</u> 0.1-0.2 m	<u>Césped grueso</u> 0.4-0.5 m	<u>Arboles</u> <u>perennes</u>	<u>Arboles</u> <u>caducas</u>
125	0.005	0.005	0.07	0.02
250	---	---	0.11	0.04
500	---	---	0.14	0.06
1.000	0.03	0.012	0.17	0.09
2.000	---	---	0.19	0.12
4.000	---	0.15	0.20	0.16

En la atenuación de los árboles, también debe de considerarse el efecto de dispersión, aunque frecuentemente los efectos reales son inferiores a los previsibles.

3.- REVERBERACION

En un recinto limitado por superficies reflectantes del sonido en mayor ó menor grado y en el cual una fuente emite una energía sonora, suponiendo un modelo de rayos de propagación de ésta energía a partir de la fuente, se puede estimar que, después de un

cierto tiempo, suficientemente largo en que dichos rayos han incidido sobre los límites del recinto y han sido absorbidos y reflejados parcialmente, se alcanza un estado de campo sonoro llamado "difuso" en el que se verifica que la densidad de energía media es igual a todo el volumen del recinto y todas las direcciones de propagación de los rayos sonoros son igualmente probables.

Una magnitud importante se puede caracterizar, en cierta forma, el campo sonoro en el interior del recinto es el "tiempo de reverberación" definido por W.C. Sabine ya en los últimos años del siglo XIX, como el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica en el recinto, una vez que ha cesado la emisión de la fuente, disminuya en 60dB, y que es una relación empírica entre el volumen del recinto y la absorción acústica del mismo. La relación entre el tiempo y la reverberación T del recinto, su volumen V y la absorción sonora A es de la forma

$$T \sim \frac{V}{A}$$

En el interior de un recinto en el cual radia una fuente sonora, la energía acústica no aumenta definitivamente pues es absorbida en el medio y en los límites del recinto. Dependiendo del tamaño del recinto, la absorción en el medio puede ser despreciable frente a la absorción en las superficies, para recintos pequeños y de tamaño medio, y tanto la velocidad de crecimiento de la amplitud del sonido como su magnitud final dependen de la absorción de las superficies, de forma que si la absorción es grande, la amplitud de la presión acústica alcanza rápidamente su valor final, y es solamente un poco mayor que la que correspondería a la onda acústica directa; lo contrario ocurre si la absorción total es pequeña, siendo grande el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario y siendo mucho mayor la amplitud alcanzada.

Si una fuente sonora comienza a radiar en el interior del recinto con poca absorción, las sucesivas reflexiones del sonido en los límites del mismo producen una distribución de la energía acústica que se hace más y más uniforme a lo largo del tiempo y que, excepto en las cercanías de la fuente y de las superficies absorbentes, llegará a ser uniforme y el flujo de energía en todos los puntos será igual en todas direcciones.

Suponiendo una fuente sonora que radia en el interior de un recinto en el cual se ha establecido una densidad de energía acústica media E' , se puede calcular el flujo de energía en las superficies límites y de ahí la absorción del recinto. Sea ΔS un elemento de superficie situado a una distancia r de un elemento de volumen dV ; r forma un ángulo θ con dicha superficie. Si E' es uniforme, en el volumen dV hay una cantidad de energía $E'dV$; suponiendo una radiación esférica de energía acústica a partir de dV , la cantidad de energía que llegará a ΔS directamente desde dV será

$$\frac{E'dV}{4\pi r^2} \Delta S \cos \theta$$

Si se considera dV como un elemento de un anillo de espesor Δr de una esfera de radio r con centro en la superficie ΔS , la energía acústica ΔE que llega a ΔS desde éste anillo, con la hipótesis de que la energía llega igualmente desde todas las direcciones, se verifica que

$$\Delta E = \frac{E' \Delta S}{4\pi r^2} \int_V dV \cos \theta$$

Si $dV = 2\pi r \sin \theta r \Delta r \Delta d$, la expresión queda en la forma

$$\Delta E = \frac{E' \Delta S \Delta r}{2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{E' \Delta S \Delta r}{4}$$

Esta energía llega en un intervalo de tiempo $\Delta t = \Delta r/c$ ($c =$ velocidad del sonido), es decir, que la velocidad de llegada de la energía es

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E' c \Delta S}{4}$$

y la velocidad de llegada de energía por unidad de superficie de elemento absorbente será

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E' c}{4}$$

Por tanto, cuando el campo sonoro es estacionario en el recinto, y si es A la absorción sonora total en el mismo, la velocidad de absorción de energía sonora en las superficies del recinto será

$$\frac{A c E'}{4}$$

que, junto con la velocidad de aumento de energía en el volumen de aire interior $V dE'/d$ debe igualar a la velocidad de producción de energía por la fuente, es decir, a la potencia acústica W de la fuente:

$$\frac{V dE'}{dt} + \frac{A c E'}{4} = W$$

$$\text{Si } E' = \frac{P^2}{\rho_0 c^2}$$

siendo P la amplitud de la presión acústica y ρ_0 la densidad del aire, al cabo de un tiempo suficientemente largo se verificarán las expresiones.

$$W = \frac{P^2 A}{4 \rho_0 c}$$

$$E' = \frac{4W}{Ac}$$

En estas expresiones A tiene dimensiones de superficie, metros al cuadrado si W se expresa en vatios.

La constante de tiempo de crecimiento de la energía sonora en el recinto es de la forma

$$\tau_E = \frac{4V}{Ac}$$

Existen limitaciones para la validez de éstas expresiones, tales como que el tiempo transcurrido después de que la fuente sonora empiece a emitir debe ser grande, para que exista un número suficiente de reflexiones; los recintos no deben tener propiedades focalizadoras del sonido ni entrantes ó aberturas a otros recintos, ó superficies anormalmente absorbentes.

3.1.- Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación, según la definición de Sabine, es el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora disminuya en 60 dB.

$$\tau_E = \frac{t_2 - t_1}{\ln(E'_1 / E'_2)}$$

$$\text{Si } E'_1 / E'_2 = 10^6 \text{ y } t_2 - t_1 = T$$

$$\tau_E = T/6 \ln 10 = T/13,8$$

$$T = 13,8 \tau_E = 13,8 \times \frac{4V}{Ac} = \frac{55,2 V}{Ac}$$

que con $c = 343 \text{ m s}^{-1}$ a 20°C

$$T = \frac{0,1634}{A}$$

expresándose V en metros cúbicos y A en metros cuadrados, ó Sabines MKS.

En el sistema ingles de unidades, con V en piés cúbicos, y A en piés cuadrados, ó Sabines en el sistema inglés de unidades,

$$T = \frac{0,049 V}{A}$$

Se puede definir la absorción por unidad de superficie de las superficies interiores del recinto como

$$a = \frac{A}{S}$$

y el tiempo de reverberación se puede expresar como

$$T = \frac{0,163 V}{Sa}$$

Esta expresión se utilizará para el cálculo de T ó de A ó a.

En hipótesis de Sabine, la absorción total A es la suma de las absorciones individuales A_i de las superficies interiores del recinto de área S_i y absorciones por unidad de superficie a_i

$$A = \sum A_i = \sum S_i a_i$$

$$a = \frac{1}{S} \sum S_i a_i$$

Estas expresiones permiten determinar las absorciones de superficies que se introducen en recintos especiales, llamados cámaras reverberantes. Si la cámara reverberante está vacía, el tiempo de

reverberación será:

$$T = \frac{0,163 V}{S a}$$

Al introducir en la cámara un material de superficie S_A y absorción a_A y colocarlo sobre una de las superficies de la cámara el tiempo de reverberación será T_A

$$T_A = \frac{0,163 V}{S a - S_A a_0 + S_A a_A}$$

Siendo a_0 la absorción de la parte de superficie primitiva cubierta por el material; la absorción del material por unidad de superficie será

$$a_A = a_0 + \frac{0,163 V}{S_A} \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T} \right)$$

El procedimiento para llevar a cabo la determinación de la absorción de los materiales está normalizado internacionalmente (NORMA ISO R354; NORMA UNE 74041). En las Normas se describen los condicionantes en cuanto a cámaras y procedimientos de medida para poder determinar la absorción de los materiales, para las distintas frecuencias del espectro sonoro.

Si se tiene en cuenta la absorción en el interior del recinto, la expresión para el tiempo de reverberación es

$$T = \frac{0,163 V}{S a + 4 m V}$$

Siendo m el coeficiente de atenuación del sonido en el aire. Una expresión del coeficiente es

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} \frac{50}{h} \frac{(f)^{1,7}}{1000}$$

donde:

h = Humedad relativa en % y f = frecuencia de sonido en Hz, para valores de h entre 20 y 70% y f entre 1.5 y 10 KHz, aproximadamente.

Existen otras expresiones más complicadas que la de Sabine para el tiempo de reverberación, como son la de Norris y Eyring.

$$T = \frac{0,163 V}{S \ln(1-a)}$$

y otras, que en determinadas condiciones se reducen a la expresión de Sabine.

3.2.- Método Cámara Reverberante

El método de la Cámara Reverberante es con el que se obtienen valores del coeficiente de absorción más próximos a las S_i fracciones reales, con varios ángulos de incidencia y es el único método que permite determinar los efectos de las condiciones de montaje de los materiales. Aunque debido a la dificultad de obtener una difusión completa del sonido en una cámara reverberante, los coeficientes de absorción obtenidos en cámara reverberante no son tan precisos como los medidos para la incidencia normal en tubo de Kundt; además el área de absorción equivalente de una muestra no es proporcional al área real debido a la difracción en los bordes de la muestra.

Para los valores del coeficiente de absorción de los materiales determinados en distintos laboratorios sean lo más coincidente posibles, se ha normalizado el procedimiento de medida y las condiciones de la misma. En España Norma UNE 74-041; a nivel internacional, Norma ISO 354-1963.

Se describen a continuación los puntos principales de ésta Norma.

Definiciones: Tiempo de reverberación

$$T = \frac{60}{d}$$

Ritmo de extinción

$$d = d_a + d_b$$

siendo d_a la parte correspondiente a la disposición de energía acústica durante la propagación en el aire.

$$d_a = \frac{10}{\ln 10} m.c. = 4,34 m.c.$$

(m , coeficiente de atenuación de energía; c , velocidad del sonido en el aire).

y d_b la parte de absorción correspondiente a las sucesivas reflexiones en las superficies límites de la cámara y en los objetos existentes en ella, definiendo el área de absorción equivalente A de la cámara de volumen V según la expresión.

$$d_b = \frac{10}{4 \ln 10} c \frac{A}{V} = 1,086 c \frac{A}{V}$$

El área de absorción equivalente A se puede calcular a partir de T ó d según las expresiones:

$$A = \left(0,92 \frac{d}{c} - 4 m \right) V$$

$$A = \left(\frac{5,53}{cT} - 4 m \right) V$$

Al introducir un objeto en la cámara se produce un aumento de absorción ΔA que se puede medir a través de los ritmos de extinción d_2 , d_1 ó tiempos de reverberación T_2 , T_1 , medidos después y antes respectivamente de introducir el objeto.

$$\Delta A = 0,92 \frac{V}{c} (d_2 - d_1)$$

$$\Delta A = 55,3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Si la temperatura y la humedad no se mantienen sensiblemente constantes, y sobre todo para frecuencias altas, es necesario tener en cuenta la variación de m

$$\Delta A = \frac{0,92}{c} (d_2 - d_1) - 4 (m_2 - m_1) V$$

Se ha considerado en ambos casos que el objeto y su correspondiente ocultación de parte de la superficie de la cámara no alteran apreciablemente el área de absorción equivalente de la cámara vacía.

En el caso de un material absorbente plano montado sobre el suelo, paredes ó techo de la cámara, su coeficiente de absorción α_s será:

$$\alpha_s = \frac{\Delta A}{S}$$

Si el material es poco absorbente hay que considerar ΔA como diferencia entre el área de absorción equivalente del material y la de la parte de paramento cubierto:

$$\alpha_s = \frac{\Delta A}{S} + \alpha_{s1}$$

siendo α_{s1} el coeficiente de absorción del parámetro cubierto.

Condiciones de medida

El volumen de la cámara debe ser preferentemente de 200 m³ y siempre superior a 180 m³.

La forma de la cámara será tal que:

$$I \text{ máx.} < 1,9 \sqrt[3]{V}$$

siendo I la longitud de la línea recta mayor contenida en la cámara.

El campo sonoro en extinción será lo suficientemente difuso, para lo cual podrá ser necesario utilizar elementos difusores apropiados colocados convenientemente, u otros procedimientos para aumentar la difusión.

Las frecuencias propias en la zona de bajas frecuencias deben estar espaciadas lo más uniformemente posible.

Los tiempo de reverberación de la cámara vacía deberán ser superiores a los valores siguientes:

5,0	5,0	5,0	4,5	3,5	2,0	segundos
125	250	500	1.000	2.000	4.000	Hertzios

y la curva del tiempo de reverberación en función de la frecuencia no debe ser irregular a bajas frecuencias.

Para materiales absorbentes planos, el material a ensayar deberá cubrir un área S continua comprendida entre 10 y 12 m² de forma rectangular, con una relación anchura-longitud entre 0,7 y 1, situada de forma que ninguna de sus partes esté a menos de 1 m de cualquier arista de la cámara.

El montaje del material en la cámara se hará según las especificaciones de uso del mismo, debiendo recubrirse los bordes de la muestra en todo su perímetro mediante superficies reflectantes de grosor no superior a 1 cm y el mismo espesor de la muestra.

El campo acústico en el interior de la cámara se generará mediante altavoces. El sonido utilizado será ruido blanco filtrado en bandas de anchura 1/3 de octava, ó como máximo de 1/2 de octava, ó tonos ululados. La desviación de frecuencias, en éste último caso, será al menos de 10% de la frecuencia media, con una frecuencia de modulación de unos 6 Hz. Para frecuencias superiores a 500 Hz es suficiente una desviación de \pm 50 Hz.

Procedimiento de medida

Para el registro de la reverberación se utilizarán uno ó varios micrófonos lo menos direccionales posible, amplificadores, posiblemente un mezclador, y un sistema de registro, que consistirá en un registrador de nivel, ó en un osciloscopio, con un amplificador logarítmico, ó en cualquier otro equipo mediante el que se pueda verificar la linealidad de la pendiente. El sistema será capaz de medir ritmos de extinción de 300 dB/s como mínimo.

Es recomendable incluir filtros de 1/1 octava si se usan tonos ululados, y de 1/3 ó 1/2 de octava si se usa ruido blanco filtrado.

El registro de ritmo de extinción obtenido por una curva ó por puntos debe aproximarse por una línea recta en la región comprendida entre 5 y al menos 35 por debajo del nivel estacionario. La pendiente de ésta línea representa el ritmo de extinción en dB/s y determina el tiempo de reverberación. Se deben desechar los registros que presenta una curvatura monótona.

Se deben realizar al menos seis registros para cada frecuencia ó banda de frecuencias dada, salvo si la experiencia demuestra que un número menor es suficiente.

Las medidas se realizarán al menos para las siguientes frecuencias medias, escalonadas en intervalos de octava: 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 Hz. Si son necesarias otras frecuencias se preferirán las de la serie de 1/3 de octava: 100, 125, 160, 200, 4.000 Hz.

Resultados

El área de absorción equivalente de los objetos, ó el coeficiente de absorción de los materiales ensayados, se expresarán en forma de tabla, curvas ó gráfico. En el caso de tablas se darán los resultados para las distintas frecuencias, en intervalos de una octava desde 125 a 4.000 Hz. En las gráficas se unirán los puntos resultantes mediante una línea quebrada, con una escala logarítmica en abscisas para la frecuencia y una escala lineal en ordenadas para el área de absorción equivalente ó el coeficiente de absorción.

Observaciones

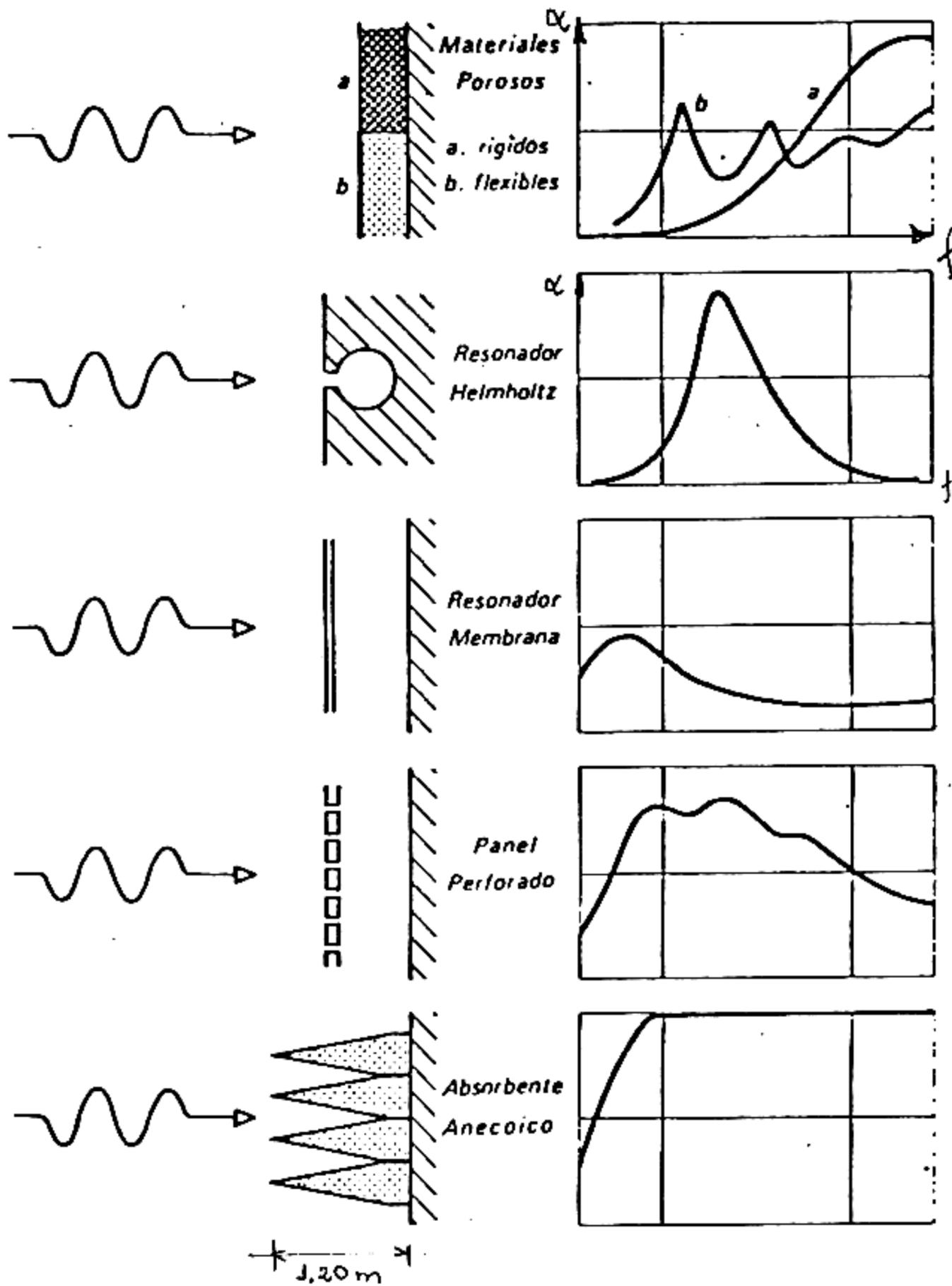
Se pueden utilizar cámaras con volumen entre 180 y 200 m³ para medidas a partir de una frecuencia límite dada por:

$$f_e = 125 \sqrt[3]{\frac{180}{V}} \text{ Hz}$$

Este es asimismo el límite inferior de frecuencia de uso para el caso de cámaras de grandes volúmenes.

Para el estudio de absorbentes por resonancia pueden ser insuficientes los intervalos de 1/3 de octava. La medida de los resonadores no es posible cuando el modo propio del resonador decae más lentamente que la reverberación de la cámara, en cuyo caso pueden emplearse cámaras pequeñas excitando un modo propio solamente.

FIGURA 2



Representación esquemática y curvas típicas de absorción de los principales tipos de absorbentes.

4.- MATERIALES ABSORBENTES (Fig. 2)

Un material se suele considerar como absorbente del sonido cuando su coeficiente de absorción es mayor que, aproximadamente 0,2.

Los absorbentes del sonido con importancia para un diseño acústico se pueden clasificar en:

- Materiales porosos.
- Absorbentes del panel.
- Resonantes.
- Personas y mobiliario.

Los materiales porosos, tales como placas acústicas, lanas minerales, recubrimientos acústicos, alfombras, etc. ..., se caracterizan por estar formados por entramados de poros ó canalizaciones conectados entre sí. En éstos canales ó cavidades pequeñas, las pérdidas de energía por viscosidad transforman parte de la energía acústica en calor, y éste es disipado. La absorción de éstos materiales depende en gran manera de la frecuencia de la onda acústica, siendo pequeña para bajas frecuencias y aumentando con el espesor del material. La absorción a bajas frecuencias se puede aumentar colocando el material a una cierta distancia del soporte rígido (paredes, techos).

Un panel no poroso que se coloca a una cierta distancia de un soporte rígido se pone en movimiento por efecto de la onda acústica que incide sobre él; ello se traduce asimismo en una conversión de energía en calor. Estos paneles son muy eficientes absorbentes para las bajas frecuencias, eficacia que puede aumentar intercalando un absorbente entre el panel y el soporte.

Los resonadores consisten en un volumen de aire confinado, conectado con el exterior por una abertura pequeña, actuando así como un resonador de Helmholtz que absorbe energía acústica del medio, en una estrecha banda de frecuencias cerca de la resonancia. Pueden ser en forma de elementos individuales, ó en forma de paneles perforados colocados a una cierta distancia de un soporte rígido, generalmente con la cavidad rellena de material poroso, con lo cual se ensancha apreciablemente la banda de frecuencias absorbidas.

Las personas y el mobiliario pueden actuar como absorbentes del sonido mediante combinaciones de los efectos anteriores.

4.1.- Materiales porosos

Un material poroso se puede caracterizar por tres variables:

La porosidad, que es la fracción de espacio vacío dentro del material, con respecto al volumen total de éste.

La resistencia al flujo del aire, que mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor de éste.

El factor de estructura, que mide la cantidad de espacio no útil, como por ejemplo los poros perpendiculares y paralelos al flujo del sonido incidente. (Un material con todos los poros paralelos a la onda incidente tiene un factor de estructura 1, mientras que un material con una estructura tortuosa de poros tiene un factor de estructura superior a la unidad.)

Las características generales de los materiales porosos se observan en un incremento superior de absorción con la frecuencia. El efecto del espesor del material también es importante. Así mismo, el efecto de colocar un material sobre un soporte rígido ó sobre unos listones que lo separen de la pared rígida.

Cuando el material poroso tiene una estructura abierta, aparecen máximos y mínimos de absorción debidos a la interferencia entre el sonido reflejado por la superficie anterior y el que sale del material después de ser reflejado en la superficie posterior. Estos máximos y mínimos se desplazan hacia las bajas frecuencias si el material se monta sobre listones, ó si se aumenta el espesor del material.

Las propiedades absorbentes de los materiales porosos dependen del tratamiento de su superficie. No deben recubrirse de pintura para no sellar los poros, ó por lo menos, la capa debe ser extremadamente fina. Pueden recubrirse con un velo ó gasa que se puede pintar.

A veces se recubren con placas metálicas perforadas; si las perforaciones son del orden de 3 mm de diámetro ó menores, y el área perforada es del orden del 15% del total, no se reduce en gran manera la absorción del material.

Si se recubre con una membrana no porosa pero flexible y muy ligera, se reduce la absorción para altas frecuencias, a partir de una frecuencia que es del orden de:

$$f = \frac{98}{m} \text{ Hz}$$

siendo m el peso de la membrana en Kg/m².

4.2.- Paneles

La absorción se debe fundamentalmente a la vibración a flexión del panel inducida por la onda acústica, y alcanza el valor máximo para la frecuencia de resonancia del panel, cuyo modo de vibración más importante es aquel para el que vibra como un diafragma sobre la capa de aire que tiene detrás. La frecuencia de resonancia depende de la masa unitaria del panel, de la rigidez del espacio del aire y de la rigidez a flexión del panel sobre los soportes.

La rigidez del espacio de aire suele ser más importante que la del panel. La frecuencia de resonancia para un panel flexible ó una membrana se puede aproximar mediante la fórmula

$$f = \frac{1.893}{\sqrt{dm}} \text{ Hz}$$

siendo d la profundidad del espacio de aire, en mm, y m la masa por unidad de superficie del panel, en Kg/m². Si el panel es poco flexible ó está rigidizado por los soportes, f puede aumentar del orden de un 50%.

Los paneles se diseñan generalmente para absorción en la zona de bajas frecuencias y la banda de frecuencias de utilidad es estrecha. Se pueden ampliar tanto la banda como la absorción colocando material poroso detrás del panel. La combinación de diferentes paneles

permiten obtener una absorción uniforme en un margen de frecuencias relativamente amplio.

Se puede obtener un efecto combinado de absorción para altas y bajas frecuencias colocando el material poroso sobre rastreles frente a una pared, ya que la absorción por efecto panel aumenta la absorción a bajas frecuencias del material.

4.3.- Resonadores

Una cavidad de paredes rígidas con volumen V , área de abertura S y longitud de cuello L , es decir un resonador de Helmholtz, actúa como un elemento acústico amortiguado, en efecto si la longitud de onda λ del sonido es mucho mayor que L , al incidir la onda sobre el resonador, el aire en el cuello se mueve como un todo (elemento de masa); si $\lambda \gg \sqrt[3]{V}$, la presión dentro de la cavidad proporciona la rigidez; y si $\lambda \gg \sqrt{S}$, la abertura radia como una fuente sonora simple (elemento resistivo).

La frecuencia de éste elemento acústico es:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

siendo: $L' = L + 1,7 a$, y a el radio de la abertura.

Si se introduce un material absorbente en la cavidad, la amplitud del movimiento del aire en el cuello del resonador se reduce, disipándose su energía más rápidamente que la del recinto excitado por la onda sonora, resultando así una absorción de energía para la frecuencia de resonancia de la cavidad.

Las placas de material poroso perforadas en su superficie con agujeros que llegan al interior tienen un comportamiento asimilable al de los resonadores de Helmholtz. Las perforaciones actúan como resonadores, apareciendo un pico de absorción para una frecuencia que crece al disminuir la profundidad: Los absorbentes de éste tipo suelen ser efectivos a partir de una frecuencia del orden de 500 Hz.

Al cubrir un material poroso con una lámina perforada puede tener dos finalidades: proteger el material absorbente sin variar mucho sus características, y/o también alterar sus propiedades absorbentes de forma que el conjunto se comporte como una serie de resonadores.

El efecto de la cubierta perforada depende evidentemente de un espesor y del tamaño y espaciado de las perforaciones, que pueden además tener distintas formas.

Las cubiertas perforadas que no tienen mucho efecto sobre las propiedades del material absorbente, son, generalmente, de metal de pequeño espesor, como se indicó anteriormente, hay un efecto de reducción de la absorción para altas frecuencias, que para el caso de perforaciones circulares, aparece a partir de una frecuencia del orden de:

$$f = 1.016 \frac{P}{d} \text{ Hz}$$

siendo d el diámetro de las perforaciones, en mm, y P el porcentaje de área perforada. Para un porcentaje dado, suele ser ventajoso reducir d y aumentar el número de perforaciones por unidad de superficie.

Si se adopta un mayor espesor de la placa ó se disminuye el área perforada, el efecto del recubrimiento es mayor y se comporta como un resonador. La expresión que da la frecuencia de resonancia, es decir, de máxima absorción, es, aproximadamente:

$$f = 5.080 \sqrt{\frac{P}{1(L + 0,8 d)}} \text{ Hz}$$

siendo l en mm la profundidad de la cavidad, es decir, la distancia del panel a la pared rígida L el espesor del panel (en mm), d el diámetro de las perforaciones (en mm) y P el porcentaje de área perforada.

Esta expresión deja de ser válida cuando se introduce un material absorbente en la cámara de aire, pero da un orden de magnitud de la frecuencia de resonancia (frecuencia de máxima absorción) que se obtiene.

4.4.- Personas y Mobiliario

No es posible dar expresiones, ni siquiera aproximadas, que relacionen parámetros ligados a las personas ó piezas de mobiliario, objetos, etc., con sus propiedades absorbentes.

4.5.- Valores de referencia de absorción de materiales

Se relacionan a continuación, a modo orientativo, diferentes materiales absorbentes representativos de los distintos tipos mencionados; el coeficiente de absorción α_m es un valor promedio en las bandas de absorción predominantes, debiéndose interpretar éstos valores como referencia para hacer una selección previa de elementos comerciales.

Materiales porosos

<u>Material</u>	<u>Formato</u>	<u>Espesor(mm)</u>	
Lana mineral 60 Kg/m ³	Placas	30	0,75
Espuma de poliretano	Planchas	20	0,6
Viruta de madera aglomerada	Placas	30	0,4
Crin de yute		20	0,4
Borra de amianto	Placas	20	0,5
Moqueta	Tapiz ó losetas	8	0,4
Terciopelo	Cortina	5	0,5
Vermiculita expandida	Capa continua por inyección	15	0,35

Paneles

<u>Material</u>	<u>Formato</u>	<u>Espesor(mm)</u>	<u>Cámara de aire</u>	<u>Banda de frecuenc. de máx. abs</u>
Contrachapado de madera	Tablero	5	50	Baja Frec. 0,3
Agglomerado de madera	Tablero	15	50	Baja Frec. 0,25
Escayola	Plancha	10	150	Baja Frec. 0,25

Material	Formato	Espesor(mm)	Cámara de aire	Banda de frecuencias de máx. abs.	
Lana mineral con cubierta plástica	Plancha ó loseta	25	150	Baja y media frec.	0,6
Lana mineral con cubierta plástica	Plancha ó loseta	25	150	Baja, media frec.	0,6
Lana mineral con cubierta plástica microperforada	Plancha ó loseta	25	150	Baja, media y alta frec.	0,7

Resonadores

(La absorción de los resonadores reseñados se extiende a las bandas de frecuencias bajas y medias y corresponde a un espesor típico del orden de 20 mm de material poroso en el trasdós).

Material	Formato	Espesor(mm)	Perforación%	Cámara de aire(mm)	
Escayola	Loseta perforada con trasdós	30	10	100	0,6
Fibra de madera aglomerada	Plancha perforada	5	15	150	0,6
Chapa metálica de 0,5 mm	Lamas ó planchas perforadas con trasdós	15	10	100	0,7
Chapa metálica de 0,5 mm	Lamas	15	Variable con rendija	100	0,6

5.- REDUCCION DE RUIDO POR ABSORCION

5.1.- En recintos

La absorción acústica contribuye a la reducción del ruido reverberado y ejerce una acción complementaria en el aislamiento acústico de un recinto, al reducir el nivel de ruido en el interior del mismo por absorción de parte de la energía de inmición.

El efecto del nivel sonoro en un recinto en el que existe una determinada cantidad de absorción A, se reduce al introducir A' unidades de absorción, en un número de decibelios dados por,

$$10 \log \frac{A + A'}{A}$$

Como todo recinto por su propia naturaleza y función incluye una cierta cantidad de absorción A, y por otra parte la superficie disponible habitualmente para introducir una absorción adicional A' difícilmente supera el 25 por ciento de la superficie total, no pueden lograrse, ni aún utilizando materiales muy absorbentes, valores de A' superiores a 10 A, con lo que la reducción máxima de nivel sonoro conseguida por efecto de absorción es del orden de 10 dB (A), límite que, en la mayoría de los casos, no alcanza los 5 dB (A), siendo lo normal reducciones de 2 a 4 dB (A). Esta reducción, aunque pequeña en cuanto a su valor considerado como contribución al aislamiento puede

tener, sin embargo, importancia como valor complementario, y sobre todo por la reducción que introduce en el tiempo de reverberación del recinto, característica relevante para determinados usos del mismo.

En la práctica, no es factible disminuir el nivel por éste procedimiento en más de 4 ó 5 dB, siendo lo normal reducciones de 2 a 4 dB.

La expresión para L_p indica asimismo que no se pueden obtener reducciones por aumento de absorción en las superficies del recinto en la proximidad de la fuente, pues el término del campo directo predominará sobre el del campo reverberante.

5.2.- En conductos y Silenciadores

Con objeto de reducir la transmisión acústica a lo largo de tubos ó silenciadores se puede utilizar un revestimiento de las paredes interiores de los mismos mediante materiales absorbentes porosos que tengan la propiedad de resistir en cierta manera la erosión superficial producida por el flujo de gas en el conducto.

La atenuación en la propagación depende de la longitud del conducto y de la relación del perímetro interior recubierto al área del conducto. Para bajas frecuencias, cuando se verifica que la relación entre la longitud del conducto l y la longitud de la onda del sonido λ es pequeña ($l/\lambda < 0,1$), la fórmula empírica de Sabine

$$\text{Atenuación} = 1,05 \alpha \frac{(\mu, \nu) P}{S} \text{ dB/m}$$

siendo α el coeficiente de absorción del material, P el perímetro recubierto del conducto, en m, y S el área abierta del conducto, en m²., da unos resultados bastante aproximados, que se hacen más inexactos al aumento l/λ .

6.- AISLAMIENTO A RUIDO AEREO

Las perturbaciones de ruido tan frecuentes en los actuales edificios, están originadas por fuentes de ruido, tanto exteriores - tráfico rodado y aéreo, obras en la calle, etc. ...-, como interiores -instalaciones, ascensores, servicios de agua y aire acondicionado-, actividad propia de la vivienda.

Estos ruidos se transmiten a las distintas dependencias del edificio a través del aire, ó de la estructura de ambas simultáneamente. En el caso de ruido de impactos -pasos, ruidos de tuberías, desplazamiento de muebles- la transmisión de la onda sonora se realiza casi exclusivamente por la estructura del edificio y otros elementos rígidos, forjados, cerramientos.

¿Como se transmite el sonido a través de la pared?. La onda sonora, compuesta por variaciones rápidas de presión, incide sobre la pared, haciéndola vibrar con ondas llamadas de "flexión". Esta vibración apenas perceptible, actúa sobre el aire que rodea la pared, de un modo similar a la membrana de un altavoz, transmitiendo sonido a los recintos próximos. Por tanto, el principio del aislamiento deberá de consistir en construir una pared que no se mueva fácilmente.

El aislamiento expresa la relación de energía que incide sobre la pared respecto a la que se transmite, y se mide en decibelios. La medida se realiza en cámaras especiales sobre muestras, ó "in situ", en obras ya realizadas. En ambos casos, es preciso tener en cuenta, las condiciones acústicas de la habitación receptora, así como el llamado efecto de flancos, debido a las transmisiones de sonido entre dos habitaciones, por estructuras y cerramientos distintos al que los separa.

El aislamiento acústico, valorado por la reducción de intensidad acústica, conviene expresarlo como ésta en dB, por lo cual basta multiplicar por 10 el logaritmo decimal de la relación de intensidades incidente (I_i) y transmitida (I_t).

$$a = 10 \log \frac{I_i}{I_t} \quad (\text{dB})$$

Con ello se consigue expresar el aislamiento como diferencia entre los niveles en decibelios de las intensidades acústicas incidente N_i y transmitida N_t :

$$a = 10 \log \frac{I_i / I_0}{I_t / I_0} = 10 \log (I_i / I_0) - 10 \log (I_t / I_0) = N_i - N_t \quad (\text{dB})$$

Estas medidas se efectúan en todo margen de frecuencias audibles, y los resultados se expresan en curvas, aunque por simplificación se utilice un único valor medio:

$$R \quad (\text{dB}) = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A}$$

donde:

S = Superficie elemento de compartimentación.

A = Absorción equivalente al recinto receptor.

L_1, L_2 = Niveles de presión sonora en el recinto emisor y receptor.

6.1.- Ley de Masa

Cuando la estructura de la pared es única y homogénea, pesada y de baja rigidez, el aislamiento a ruido aéreo se puede producir mediante la conocida Ley de Masa, que establece un aumento teórico de 6dB cada vez que se dobla la masa por unidad de area de la pared, ó cada vez que se doble la frecuencia del sonido transmitido. En la fig. 3, se representa gráficamente ésta Ley, tomando como variable el producto masa x frecuencia.

El aislamiento depende también del ángulo de incidencia del sonido, y en la práctica para ángulos de incidencia entre 0° y 80°, corresponde a un aumento de 5 dB del aislamiento al duplicar la masa ó la frecuencia. (Fig. 4).

El compartimiento de una pared ante la onda sonora no queda totalmente aclarado con la Ley de Masa, existen otros fenómenos, como son las resonancias que aparecen a bajas frecuencias y llegan a anular el aislamiento. El fenómeno más importante es el fenómeno de coincidencia. (Fig. 5)

Las ondas de flexión responsables de la vibración de la pared, son de un tipo diferente a las ondas de compresión del sonido, y su velocidad varía con la frecuencia.

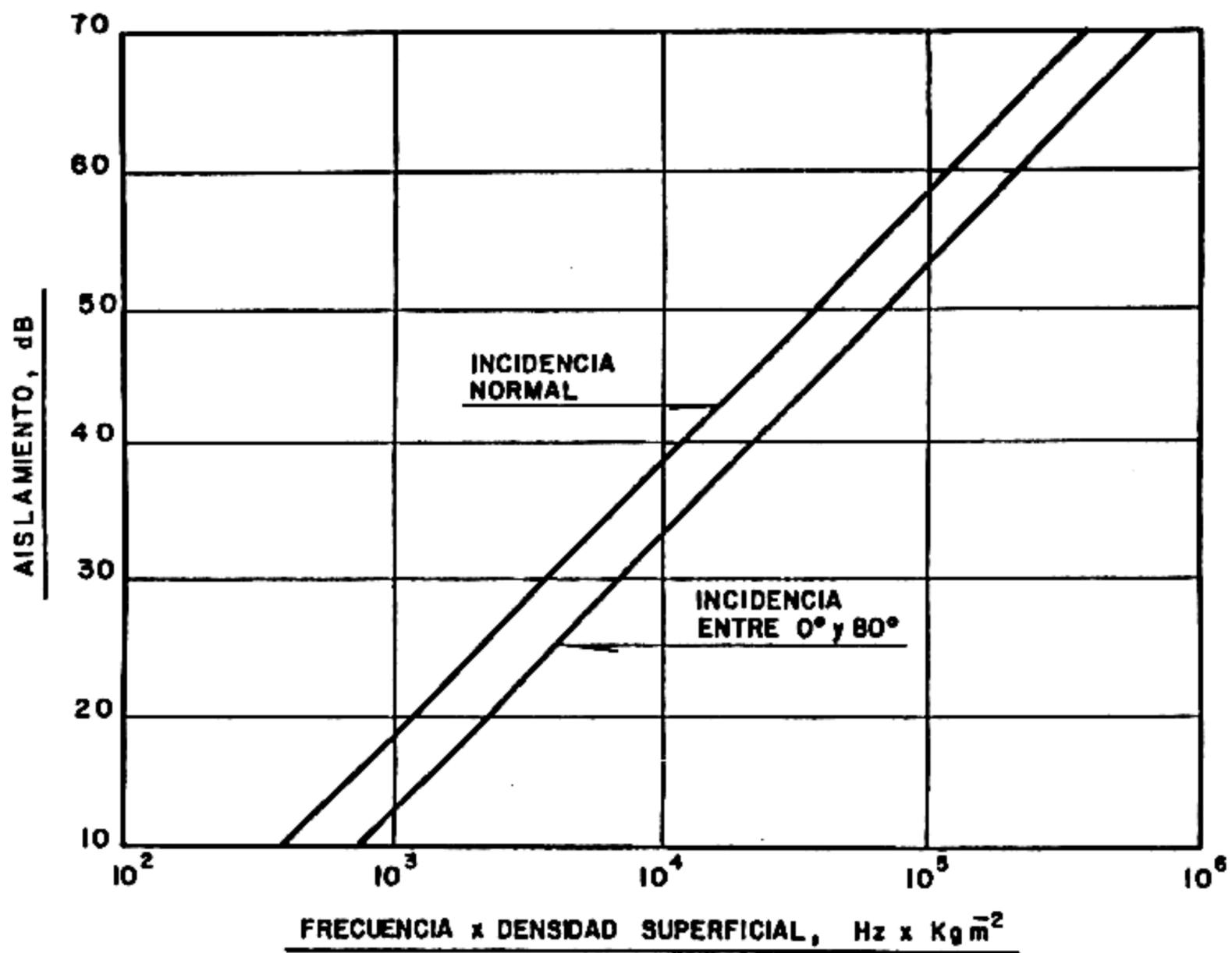


Fig. 3 .- Ley de Masa

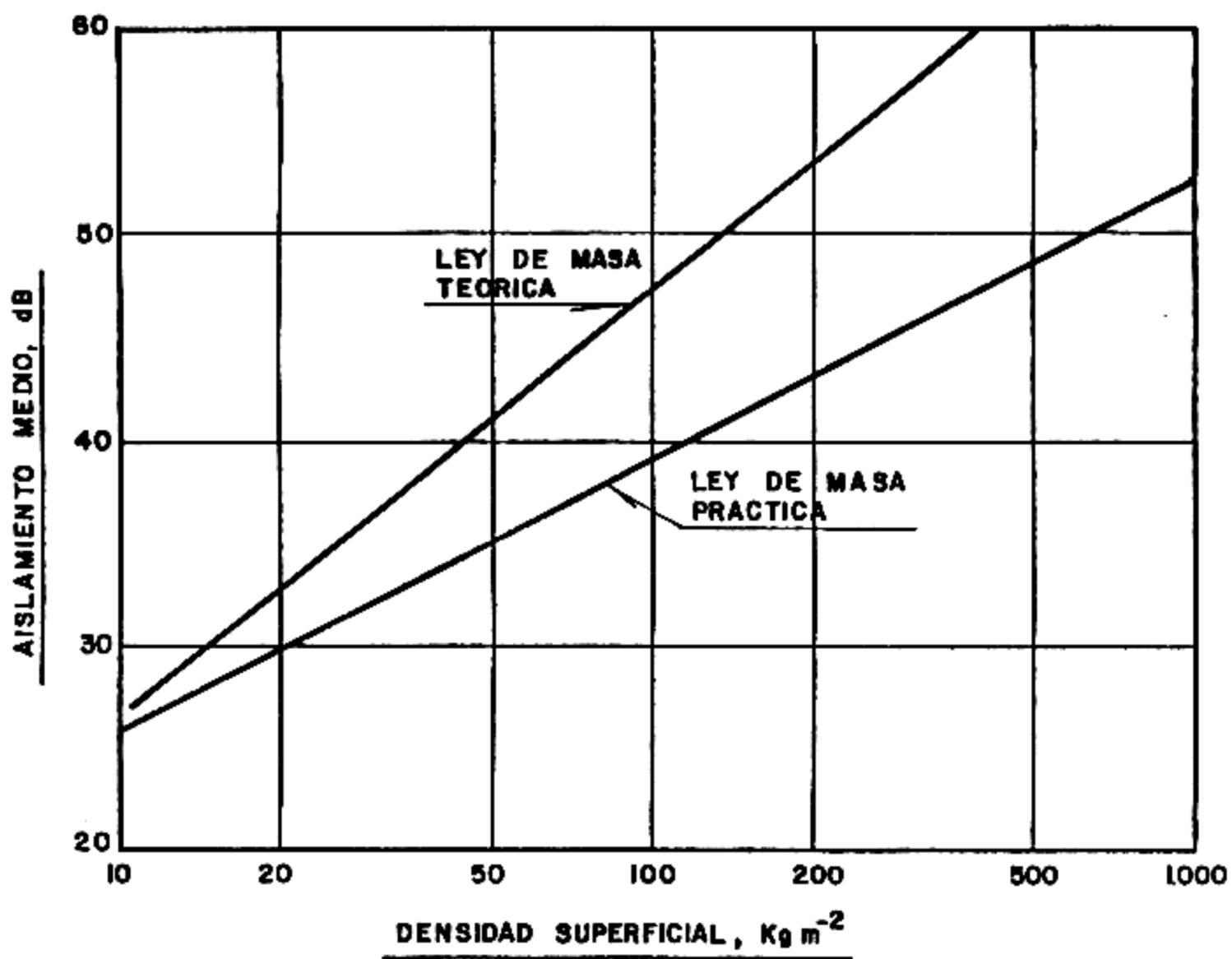


Fig 4 - Ley de Masa "practica"

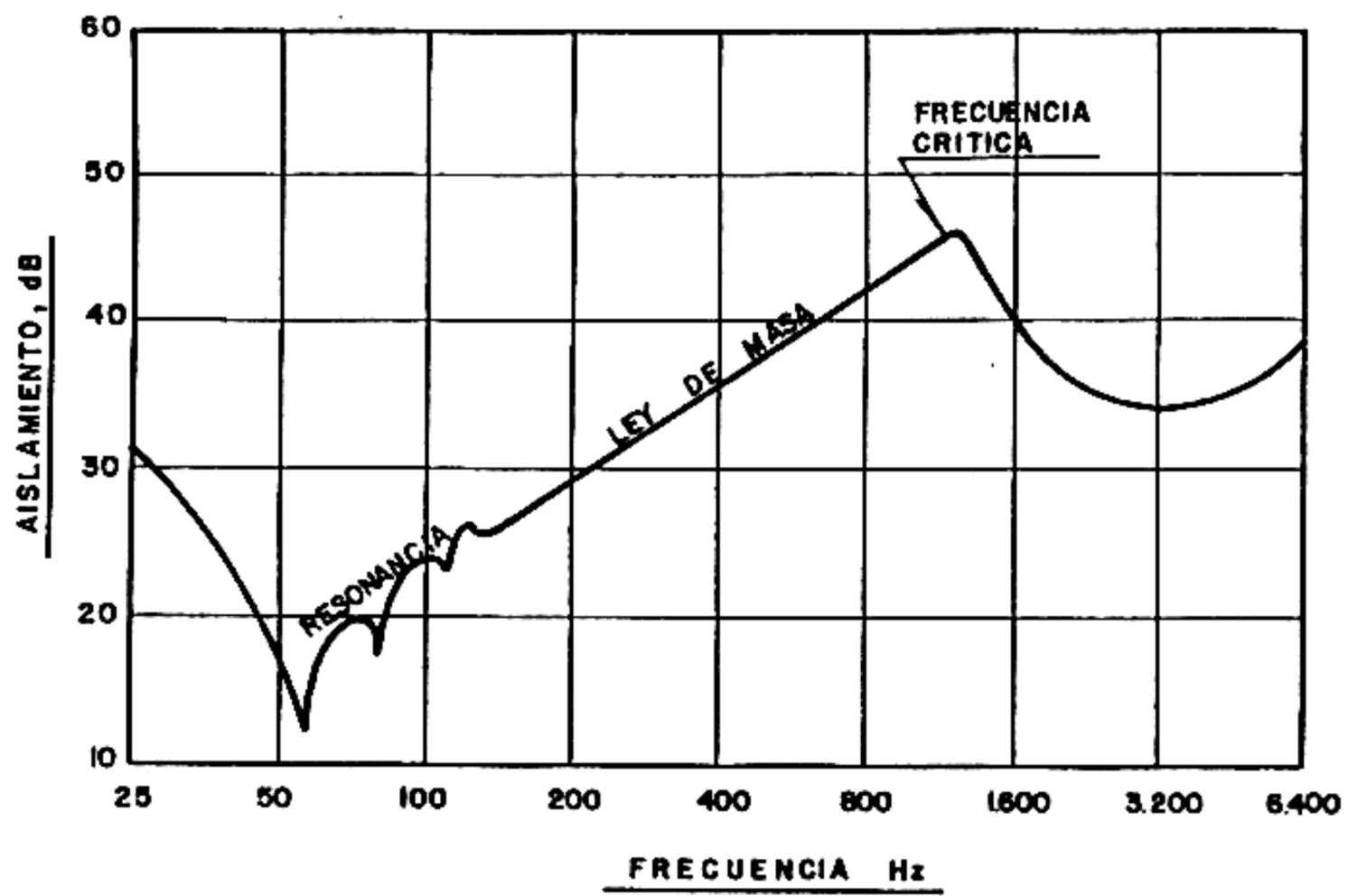


Fig. 5r Curva de aislamiento típica
de una pared simple

...
...
...
...
...

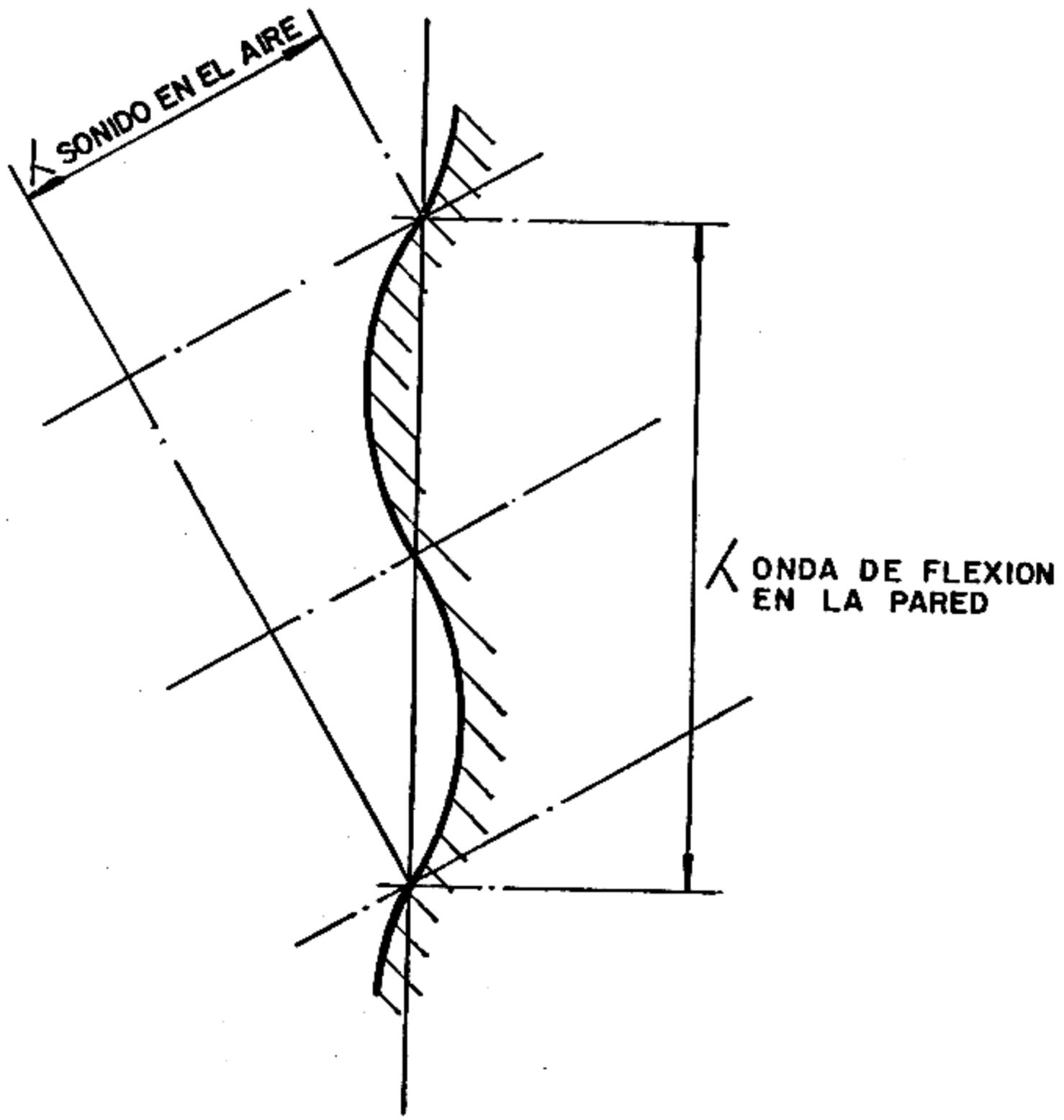


Fig.6 Efecto de coincidencia

Para una determinada frecuencia, llamada "Frecuencia Crítica" las velocidades de la onda de flexión en la pared y sonora en el aire coinciden, y al ser la misma frecuencia también coinciden las longitudes de onda, estableciéndose una transmisión casi perfecta, de energía entre el aire y la pared, con la consiguiente disminución del aislamiento.

Para las frecuencias altas mayores que la de coincidencia el aislamiento es también inferior al predicho por la Ley de Masa, ya que siempre existe un ángulo para el que la longitud de onda efectiva del sonido al incidir sobre la pared coincide con la longitud de la onda de flexión.

En el diseño de una pared aislante será preciso considerar no solo masa elevada, sino una rigidez muy baja, por una parte para que la frecuencia de resonancia se presente en la zona baja del espectro audible, donde el oído es menos sensible, y por otra parte, para que la frecuencia crítica sea tal alta como sea posible, y caigan en la zona donde el aislamiento es mayor. Material ideal que cumple éstas propiedades es el plomo, pero por su costo y difícil instalación no es muy utilizado en cerramientos. Otro factor, a tener en cuenta, es la permeabilidad de la pared al paso del aire, con un simple enlucido se pueden ganar hasta 5 dB de aislamiento.

5.2.- Doble pared

En la práctica la construcción de edificios con doble cerramiento, principalmente en fachadas, se utiliza para aislar térmicamente, y no siempre se tienen en cuenta detalles constructivos para alcanzar simultáneamente un buen aislamiento acústico.

El aislamiento de una doble pared con cámara, comparativamente con una pared simple de igual masa por unidad de superficie, presenta una mayor ventaja para frecuencias por encima de la resonancia. (Fig. 7.)

A bajas frecuencias el aire entre las dos paredes actúa de muelle, con su frecuencia de resonancia propia en la que se acoplan perfectamente las impedancias de las dos paredes, anulándose el aislamiento del conjunto. En la práctica ésta frecuencia debe de ser baja, inferior a 100 Hz.

Por encima de la frecuencia de resonancia, el aislamiento crece del orden de 9 dB, al duplicar la masa ó la frecuencia, más rápidamente que según indica la Ley de Masa para una simple pared de igual masa.

Las resonancias que se presentan a altas frecuencias, se pueden reducir rellenando la cavidad con material absorbente -lana mineral ó de vidrio, espumas, flexibles, etc.- El material no es preciso que llene por completo la cavidad. El relleno absorbente de la cavidad es más efectivo en tabiques dobles ligeros, y poco importante con tabiques pesados. (Fig. 8).

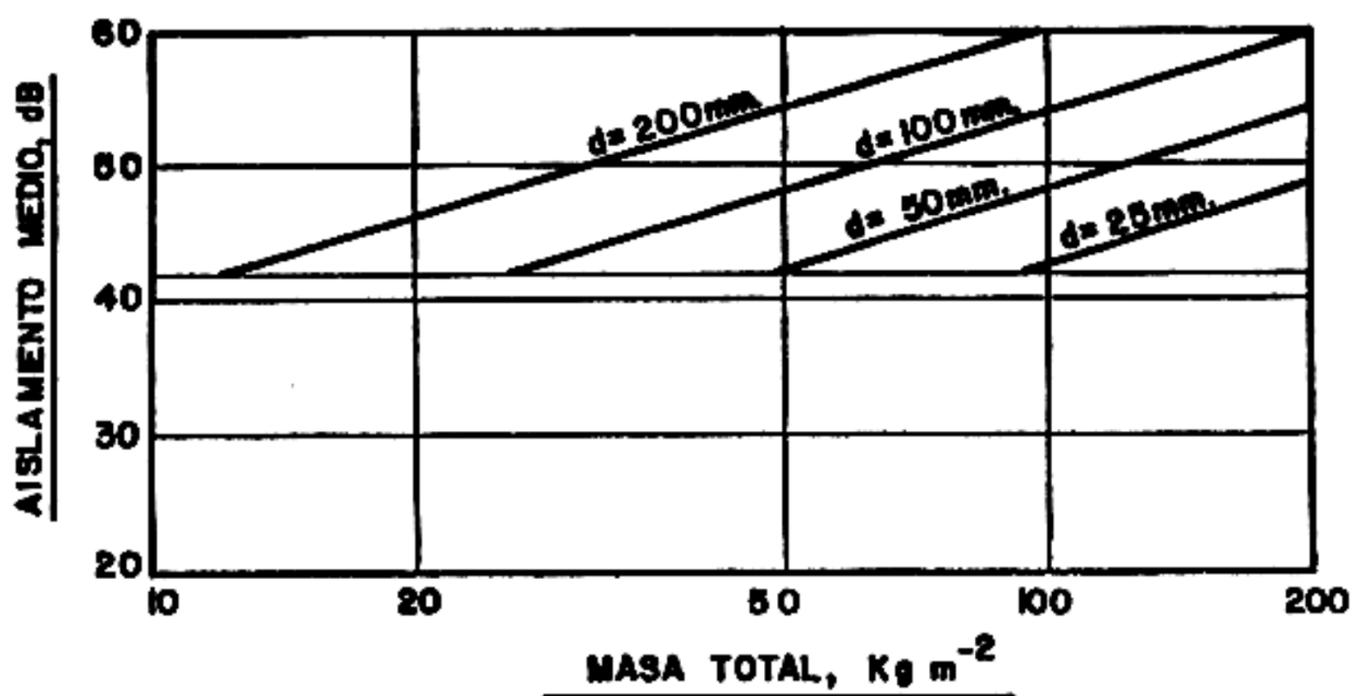


Fig. 7 - Aislamiento medio de una doble pared

siendo d el diámetro de las perforaciones, en mm, y P el porcentaje de área perforada. Para un porcentaje dado, suele ser ventajoso reducir d y aumentar el número de perforaciones por unidad de superficie.

Si se adopta un mayor espesor de la placa ó se disminuye el área perforada, el efecto del recubrimiento es mayor y se comporta como un resonador. La expresión que da la frecuencia de resonancia, es decir, de máxima absorción, es, aproximadamente:

$$f = 5.080 \sqrt{\frac{P}{1(L + 0,8 d)}} \text{ Hz}$$

siendo l en mm la profundidad de la cavidad, es decir, la distancia del panel a la pared rígida L el espesor del panel (en mm), d el diámetro de las perforaciones (en mm) y P el porcentaje de área perforada.

Esta expresión deja de ser válida cuando se introduce un material absorbente en la cámara de aire, pero da un orden de magnitud de la frecuencia de resonancia (frecuencia de máxima absorción) que se obtiene.

4.4.- Personas y Mobiliario

No es posible dar expresiones, ni siquiera aproximadas, que relacionen parámetros ligados a las personas ó piezas de mobiliario, objetos, etc., con sus propiedades absorbentes.

4.5.- Valores de referencia de absorción de materiales

Se relacionan a continuación, a modo orientativo, diferentes materiales absorbentes representativos de los distintos tipos mencionados; el coeficiente de absorción α_m es un valor promedio en las bandas de absorción predominantes, debiéndose interpretar éstos valores como referencia para hacer una selección previa de elementos comerciales.

Materiales porosos

Material	Formato	Espesor(mm)	
Lana mineral 60 Kg/m ³	Placas	30	0,75
Espuma de poliuretano	Planchas	20	0,6
Viruta de madera aglomerada	Placas	30	0,4
Crin de yute		20	0,4
Borra de amianto	Placas	20	0,5
Moqueta	Tapiz ó losetas	8	0,4
Terciopelo	Cortina	5	0,5
Vermiculita expandida	Capa continua por inyección	15	0,35

Paneles

Material	Formato	Espesor(mm)	Cámara de aire	Banda de frecuenc. de máx. abs	
Contrachapado de madera	Tablero	5	50	Baja Frec.	0,3
Agglomerado de madera	Tablero	15	50	Baja Frec.	0,25
Escayola	Plancha	10	150	Baja Frec.	0,25

Otros factores a considerar en la ejecución de dobles tabiques, son los puentes acústicos entre la doble pared, defecto muy frecuente en la construcción normal y que si térmicamente, no tiene importancia, disminuye mucho el aislamiento acústico. (Fig. 9)

Otra vía de transmisión es la unión perimetral de las estructuras de los dos tabiques. Para conseguir aislamientos altos, por encima de los 40 dB, deberán ser completamente independientes y aisladas, tanto respecto al suelo y paredes como respecto al techo. Este tipo de ejecución es complicada y costosa, por lo que solo se reserva para casos muy especiales, como pueden ser salas para equipos de ordenadores, para reuniones de alto nivel, etc.

El aislamiento práctico de una doble pared se puede estimar por la fórmula:

$$A \text{ (dB)} = 20 \log (M \times d_{\text{cavidad}}) - 26$$

y que se expresa en la figura según Lord.

Para evitar un aislamiento pobre en bajas frecuencias, no se deberán de usar dobles paraedes que den según la fórmula un aislamiento menor de 40 dB.

BIBLIOGRAFIA

- BERANEK L.L.: Editor (1960). Noise Reduction. McGraw Hill book Cok. Inc. (New York).
- CREMER L.; MÜLLER, H.A.: (1982). Principles and Applications of room acoustics. Applied Science Publishers (London).
- KINSLER, L.E.; FREY, A.R.; CEPPENS, A.B.; SANDERS; J.V.: (1982) Fundamentals of Acoustics. John Wiley & Sons Ltd. (New York).
- LARA SAENZ, A.; STEPHENS, R.W.B.: Editores (1986) Noise pollution. John Wiley & Sons Ltd. (New York).
- LARA SAENZ, A.; MORENO ARRANZ, A.; SANTIAGO PAEZ, J.S.: (1975). Condicionantes acústicos en la Edificación. Bases del control de ruido en edificios. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid).
- SANTIAGO PAEZ, J.S.; (1927). El Ruido como Agente Contaminante en la Industria. Exmo. Ayuntamiento de Zaragoza y Mutua de Accidentes de Zaragoza.