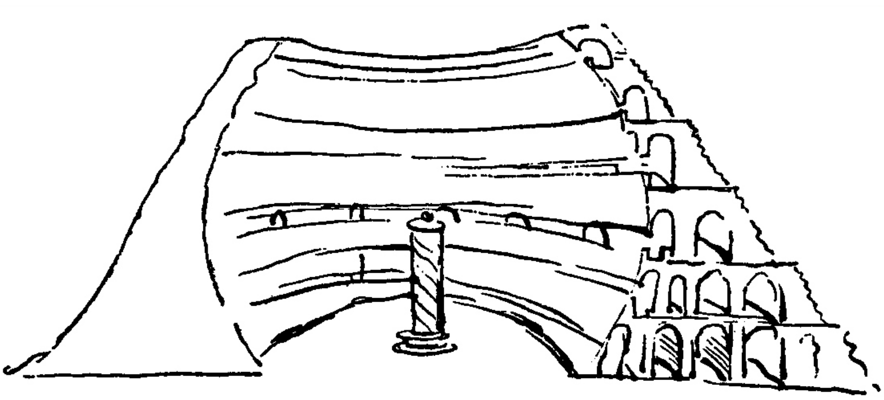
Acústica técnica I



Benoit Beckers

INTRODUCCION

En esta primera parte, se explica cómo calificar con magnitudes acústicas nuestra percepción del sonido, a partir de las características fisiológicas de la audición humana.

En una descripción puramente física, bastaría enumerar las intensidades de cada frecuencia excitada por la emisión de un sonido (espectro frecuencial), y explicitar luego cómo éste se va modificando en su propagación, hasta alcanzar un receptor determinado.

Las magnitudes necesarias para describir la emisión se limitan entonces a la frecuencia (en *hercios*, Hz) y la potencia (en *vatios*, W). La propagación se mide entonces con la intensidad (en *julios por metro cuadrado*, J/m^2).

En el caso de una emisión esférica (u *omnidireccional*), la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia.

Sin embargo, nuestro oído percibirá este sonido escorzándolo, y con una sensibilidad a las intensidades que varía en función de la frecuencia.

Las magnitudes acústicas toman en cuenta estas peculiaridades fisiológicas, para describir el sonido tal y como lo percibe nuestro oído.

El escuerzo frecuencial se manifiesta en la consideración de las *bandas de frecuencia* y el escorzo en intensidad en el uso de los *niveles sonoros*, definidos a partir de la función logarítmica. Las curvas de sensibilidad han originado los *filtros de ponderación*.

Cualquier ruido puede finalmente describirse como la suma de niveles sonoros emitidos o percibidos en determinadas frecuencias y ponderados con el filtro adecuado.

Para describir la emisión, se utiliza el nivel sonoro en potencia (L_W) y para la propagación y la percepción el nivel sonoro en intensidad (L_I) o en presión (L_p). Las bandas de frecuencia más comunes son las bandas de octavas, y el único filtro de ponderación utilizado en la construcción es el filtro “A”. Los niveles sonoros se describen entonces en “dB(A)” (en *decibelios A*).

1. La función logarítmica

La función logarítmica de base *a* ($y = \log_a x$) puede definirse de dos maneras equivalentes: como la inversa de la función exponencial de misma base ($y = a^x$), o como la relación existiendo entre, por una parte, los términos de una progresión geométrica de razón *a*

x =	$\{a^{-n}$	...	a^{-3}	a^{-2}	a^{-1}	1	a	a^2	a^3	...	$a^n\}$

y, por otra parte, los términos correspondientes de la progresión aritmética

y =	{-n	...	-3	-2	-1	0	1	2	3	...	n}

de modo que

$$\log_a 1 = 0 \qquad (1)$$

En las matemáticas, la base *a* más empleada es el número irracional e = 2,71828..., que define la exponencial propiamente dicha ($y = e^x$) y su inversa, el logaritmo neperiano ($y = \log_e x = \ln x$). La otra base de uso común es *a* = 10, que define el logaritmo decimal, el que se usa en acústica, y que se nota $y = \log_{10} x$, o simplemente, sin el indicio, $y = \log x$.

La función logarítmica presenta las tres propiedades siguientes:

$$\log_a a = 1 \text{ (por lo tanto: } \ln e = 1, \log 10 = 1) \qquad (2)$$
$$\log_a u^m = m \log_a u \qquad (3)$$
$$\log_a uv = \log_a u + \log_a v \qquad (4)$$

A partir de *(3)* y *(2)*, se verifica que $\log_a a^x = x$, es decir que la función logarítmica, aplicada a una función exponencial de misma base, la convierte en la función lineal y = x. Exponencial y logaritmo tienen por lo tanto un comportamiento inverso.

Para *a* > 1, mientras que la función exponencial progresa cada vez más rápido cuando x aumenta (eso es: un comportamiento exponencial), la función logarítmica crece rápidamente desde $\log_a 0 = -\infty$ hasta $\log_a 1 = 0$ (como una hipérbola), y luego cada vez más lentamente hacia el infinito (como una parábola). Así:
log 1 = 0, log 10 = 1, log 100 = 2, log 1 000 = 3, log 10 000 = 4, ...
log 20 = 1.3, log 40 = 1.6, log 80 = 1.9, log 160 = 2.2, log 320 = 2.5, ...

En la física, dos tipos de comportamientos destacan: en los fenómenos *lineales*, el efecto está en proporción (directa o inversa) de la causa, mientras que en los fenómenos *exponenciales* o *logarítmicos*, una evolución constante en la causa se ve acelerada (o decelerada) en el efecto. Este segundo tipo es el que suele observarse en la fisiología de la percepción (ley de Weber-Fechner).

La fisiología de la audición ofrece dos ejemplos de un comportamiento logarítmico, en frecuencia y en intensidad. El oído percibe el mismo intervalo entre 80 Hz y 160 Hz como entre 160 Hz y 320 Hz, es decir que percibe esta progresión geométrica como si fuera aritmética, como si le aplicara un filtro logarítmico.

Lo mimo ocurre en la intensidad, justificándose luego el uso del *decibelio*, que consiste en una función logarítmica.

Ejercicio 1:

a) Sabiendo que log 2 ≈ 0.301 y log 3 ≈ 0.477, evaluar, sin recurrir a la calculadora:
log 4; log 5; log 6; log 8; log 12; log 125; log 300; log 320; log 1024; log 50000; log 0.2

b) Esbozar las funciones y = log x, y = 10^x en los ejes (x, y) y mencionar el eje de simetría.

2. El nivel sonoro

La energía acústica puede expresarse como *potencia* (W, energía por unidad de tiempo, en vatios), como *intensidad* (I, energía por superficie, en julios por metro cuadrado) o mediante el cuadrado de la *presión eficaz* (p_{eff}, en pascales). Sin entrar en detalles, se admite aquí la relación que une estas dos últimas magnitudes en las ondas progresivas:

$$I \approx \frac{p_{eff}^2}{400} \qquad (1)$$

A la frecuencia de 1000 Hz, los umbrales de la percepción corresponden a presiones eficaces de 2.10^{-5} Pa (umbral de audición) y 20 Pa (umbral de dolor). El primero sirve de referencia para definir el nivel sonoro, dando niveles respectivos de 0 dB y 120 dB para los umbrales:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_0} \qquad (2)$$

Una expresión equivalente es el nivel de intensidad, cuya referencia I_0 es deducida de p_0 y de la ecuación *(1)*:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ donde } I_0 = 10^{-12} \text{ J/m}^2 \qquad (3)$$

Estas dos expresiones son intercambiables, y se habla indiferentemente de *nivel sonoro*, en presión (L_p) o en intensidad (L_I).

Una fuente sonora es descrita por su potencia (en vatios) o por su nivel de potencia:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ donde } W_0 = 10^{-12} \text{ W} \qquad (4)$$

El cuadro siguiente indica los niveles máximos de diferentes fuentes sonoras:

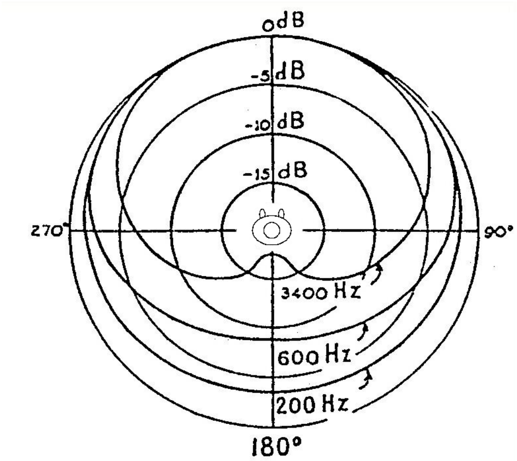
	W (vatios)	L_W (dB)
voz femenina voz masculina	0.002 0.004	93 96
clarinete	0.05	107
violín	0.16	112
orquesta	10 ⇒ 70	130 ⇒ 138

Para deducir la potencia del nivel de potencia (o la intensidad del nivel sonoro), hay que invertir las fórmulas anteriores:

$$\frac{L_W}{10} = \log\frac{W}{W_0} \Rightarrow 10^{\frac{L_W}{10}} = 10^{\log\frac{W}{W_0}} = \frac{W}{W_0}$$

y, por lo tanto:

$$W = W_0 \cdot 10^{\frac{L_W}{10}}$$



En general, la emisión de una fuente sonora no es omnidireccional: el cuerpo del hablante o del instrumentista, por ejemplo, hace obstáculo, y limita la propagación del sonido hacia atrás. La siguiente figura muestra el caso de un cantante.

Se observa que la atenuación es fuerte en las altas frecuencias (puede superar los 15 dB), pero casi inexistente en las bajas frecuencias, debido a la difracción del sonido.

En todo caso, la acústica arquitectónica considera siempre estos fenómenos como simples correcciones al caso estándar de la emisión esférica (omnidireccional), la cual se caracteriza por una disminución de la intensidad sonora proporcional al cuadrado de la distancia (la potencia emitida se va repartiendo sobre una esfera cada vez mayor, a medida que el sonido se aleja del punto de emisión):

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad (5)$$

Las ecuaciones anteriores se combinan entonces en:

$$L_I = L_W - 20\log r - 11 \qquad (6)$$

Esta fórmula indica que si una fuente emite un sonido de 100 dB, por ejemplo, engendrará un nivel sonoro de 89 dB a un metro de distancia. Luego, el nivel sonoro bajará de seis decibelios cada vez que se duplique la distancia, de modo que será de 83 dB a 2 m, de 77 dB a 4m., de 71 dB a 8 m, de 65 dB a 16m., ...

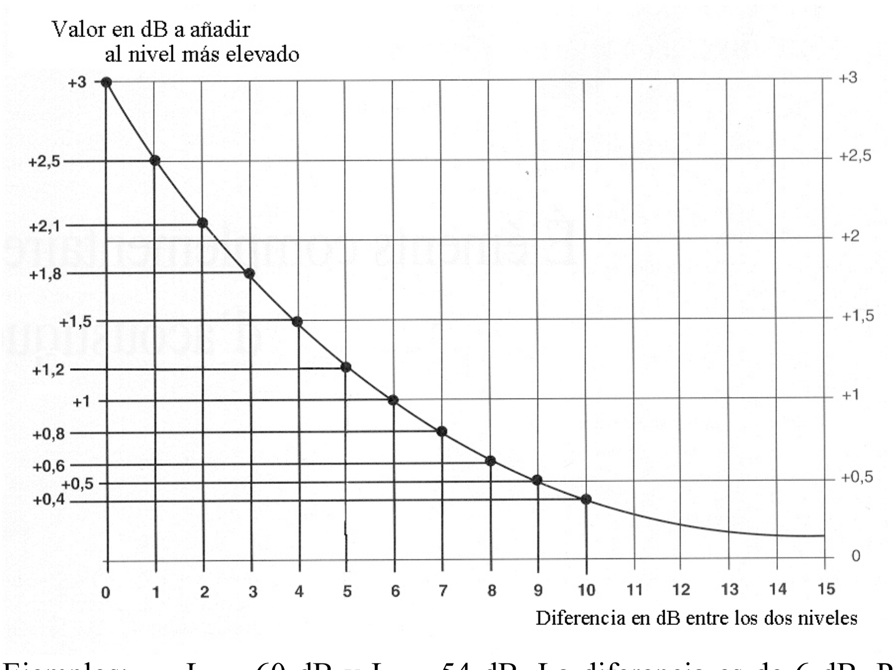
Para sumar niveles sonoros, hay que sumar las energías (intensidades, potencias, cuadrado de presiones eficaces) y no los niveles. Así, dos contribuciones I_1 e I_2 dan una intensidad total $I = I_1 + I_2$, correspondiendo a un nivel

$$L_I = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_0} = 10 \log (10^{0.1 L_1} + 10^{0.1 L_2})$$

Si las dos contribuciones son iguales ($I_1 = I_2$), el nivel resultante aumenta de 3 dB:

$$L_I = 10 \log \frac{2 I_1}{I_0} = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log 2 = L_{I_1} + 3$$

Si las contribuciones son distintas, hace falta una calculadora o, ya que la acústica no necesita una precisión importante (los valores finales siempre se redondean en decibelios, prescindiendo de las decimales), se puede utilizar el diagrama siguiente:



Ejemplos: L_1 = 60 dB y L_2 = 54 dB. La diferencia es de 6 dB. Por lo tanto, hay que añadir un decibelio a la contribución más importante, y la suma da 61 dB.

L_1 = 60 dB y L_2 = 50 dB. Sólo hay que añadir 0.4 dB. El resultado, de 60.4 dB, se redondea luego a 60 dB. La segunda contribución es despreciable.

Ejercicio 2:

a) Sumar las cinco contribuciones siguientes: L_1 = 60 dB y $L_2 = L_3 = L_4 = L_5$ = 48 dB. *Nb.: Si hay más de dos contribuciones, es imprescindible sumar primero las cantidades inferiores. Sólo así se obtiene el resultado correcto.*
b) Deducir de la fórmula (6) la disminución de L_p cada vez que se duplica la distancia, y cada vez que se decupla.
c) Evaluar el nivel sonoro L_p inducido por una emisión L_W = 100 dB a 3m., 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m y 100 m de la fuente. ¿Qué ocurre cuando L_W = 110 dB?
d) ¿Qué ocurre cuando una fuente sonora se coloca contra una pared reflectora?

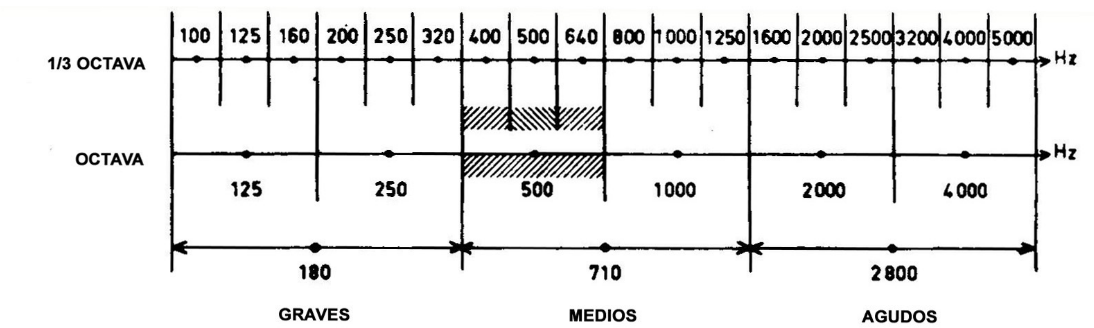
3. El ruido

El ruido es una mezcla compleja de sonidos; se caracteriza por su *espectro frecuencial*, la variación de su intensidad en función de la frecuencia. El oído percibe este ruido de manera global, reconociendo en él una voz humana, una máquina, o el viento a través de una arbolada.

En la práctica, un ruido se analiza por bandas de frecuencias, mediante filtros acústicos que permiten medir el nivel de presión en *bandas de octavas* o, para un estudio más fino, de *tercios de octavas*. Estas bandas han sido normalizadas. Están centradas en las frecuencias siguientes (la primera línea corresponde a las bandas de octavas):

16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
20	40	80	160	320	640	1250	2500	5000	10000	
25	50	100	200	400	800	1600	3200	6400	12500	

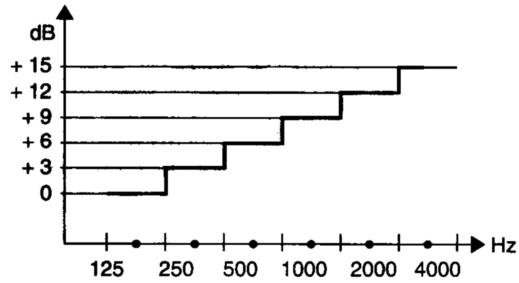
En la construcción, los estudios suelen limitarse entre 100 Hz y 5 000 Hz.



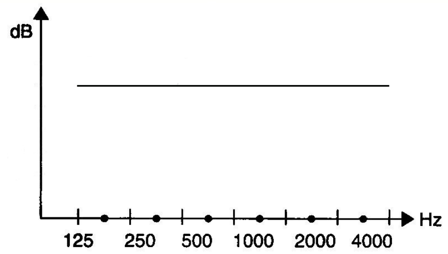
Para un análisis sumario, esta escala puede resumirse en tres bandas, de dos octavas cada una: las frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz), medias (500 Hz y 1 000 Hz) y altas (2 000 Hz y 4 000 Hz).

Las fuentes sonoras pueden emitir tres tipos de ruido, que han sido normalizados para los estudios acústicos.

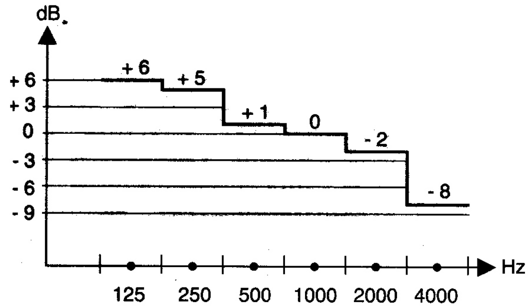
El *ruido blanco* contiene todas las frecuencias audibles con el mismo nivel de presión sonora. Sin embargo, una banda de octava en los agudos contiene más frecuencias, y por lo tanto más energía, que en los graves. Como cada banda es el doble de ancho que la anterior, el nivel sonoro sube cada vez de tres decibelios.



El *ruido rosa* tiene una energía constante por unidad de intervalo logarítmico, es decir que la energía contenida en cada banda de octava o de tercio de octava es constante.



El *ruido de tráfico* simula el ruido producido por las carreteras y ferrocarriles. Su espectro es continuo y la energía contenida en cada banda de octava está normalizada en relación con la energía contenida en la banda de octava centrada en 1 000 Hz. Se caracteriza por tener más energía en las bajas frecuencias.



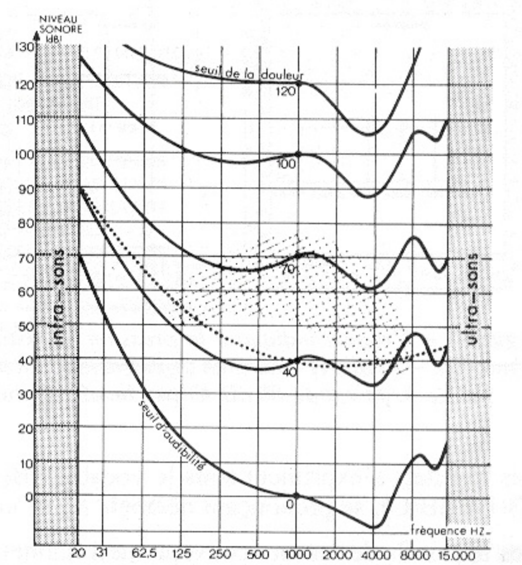
Ejercicio 3:

Evaluar el nivel total, correspondiendo a la suma de las seis bandas de octava, emitido por un ruido blanco, un ruido rosa y un ruido de tráfico que emiten 80 dB a 1000 Hz.

4. Sensibilidad del oído

La sensibilidad del oído sigue un comportamiento logarítmico tanto en frecuencia como en intensidad. Sin embargo, su sensibilidad en intensidad varía en función de la frecuencia: es máxima entre 500 y 5 000 Hz y se debilita mucho en los graves. Así, un sonido de 50 dB a 1000 Hz produce la misma impresión de nivel sonoro que un sonido de 67 dB a 100 Hz.

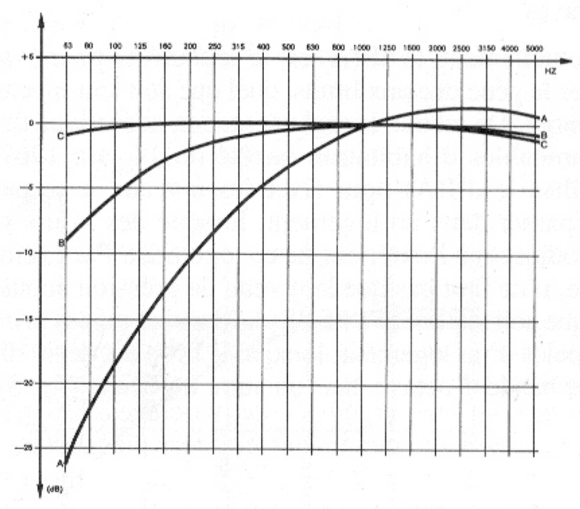
El gráfico de sensibilidad muestra este comportamiento del oído entre los cuatros



umbrales: dos en frecuencia (aquí fijados a 20 y 15000 Hz), y dos en intensidad (el *umbral de audición*, por debajo del cual no se oye, y el *umbral de dolor*, por encima del cual la sensación producida es dolorosa). Estos últimos coinciden, respectivamente, con las curvas inferior y superior del gráfico. Cada una de las tres curvas intermedias manifiesta una sensación igual del nivel sonoro, calibrada a 40, 70 y 100 dB en la frecuencia de 1000 Hz.

Nótese que se pueden oír niveles sonoros negativos en decibelios, ya que la sensibilidad del oído es máxima a 4 000 Hz, mientras que los valores límites de 0 y 120 dB han sido definidos por un sonido de 1000 Hz.

Niveles de presión acústica ponderados



Para obtener, mediante aparatos, unas medidas representativas del nivel sonoro percibido por el oído, teniendo en cuenta su sensibilidad variable, hay que introducir en los circuitos eléctricos unos filtros que reproduzcan las curvas de igual sensación del oído. Las *curvas de ponderación* representan las correcciones aportadas por esos filtros, limitados en la práctica a tres tipos: los filtros A, B, y C, que corresponden, respectivamente, al comportamiento del oído en los niveles bajos (<55 dB), medios (55 dB a 85 dB) y elevados (>85 dB), y cuyos resultados se expresan en dB(A), dB(B) y dB(C). Estos niveles pueden diferir mucho del nivel no ponderado. Así, un ruido de 80 dB puede corresponder a 40 dB(A), si comporta muchas frecuencias graves. Actualmente, sólo se usa el dB(A) para evaluar las molestias sonoras en los edificios, cual sea el nivel sonoro. Las ponderaciones del filtro A son las siguientes:

Frecuencias medianas de las bandas de octava (en Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Ponderación del filtro A (en dB)	-15.5	-8.5	-3	0	+1	+1

Ejercicio 4:

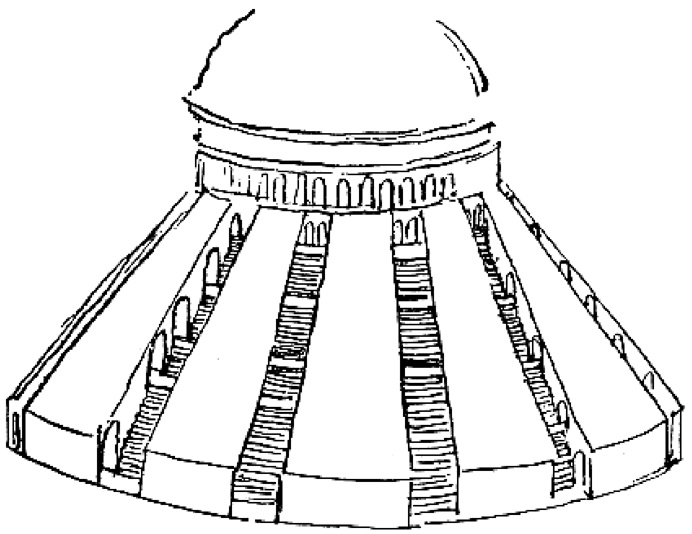
Repetir el ejercicio 3, pero aplicando las ponderaciones del filtro A. Explicar las diferencias observadas entre los niveles en dB y en dB(A).

Referencias:

"Auditorium Acoustics and Architectural Design", M. Barron, ed. E&FN Spon, 1993
"L'acoustique du bâtiment par l'exemple", M. Meisser, ed. Le Moniteur, Paris, 1994
"Réussir l'acoustique d'un bâtiment", L. Hamayon, ed. Le Moniteur, Paris, 199

La ilustración de la primera página es un dibujo de Leonardo da Vinci : « teatro para oír misa », copiado de « Architecture et musique », M. Forsyth, ed. Mardaga, 1987.

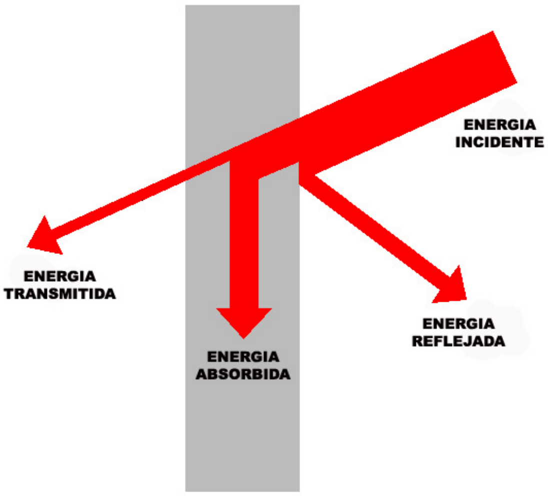
Acústica técnica II



Benoit Beckers

INTRODUCCION

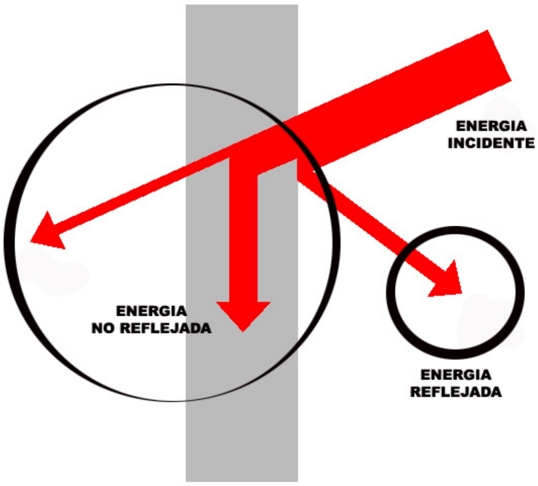
En esta segunda parte, se explica cómo calificar con magnitudes acústicas la interacción del sonido con la materia.



Cuando un sonido alcanza un obstáculo, una parte se transmite más allá, otra parte se refleja, y el resto queda absorbido. El balance entre transmisión y absorción define la capacidad de *aislamiento* de este obstáculo; el balance entre reflexión y absorción define la participación de este obstáculo a la *reverberación*.

Considerando un interior, podemos estudiar su aislamiento acústico, es decir la relación entre el recinto que lo delimita y el mundo sonoro exterior. Podemos también estudiar su reverberación, es decir la implicación del recinto en el campo sonoro que se establece en este interior cada vez que se emite en él algún sonido.

Así, vemos que los problemas acústicos de reverberación y de aislamiento pueden, hasta cierto punto, estudiarse por separado.

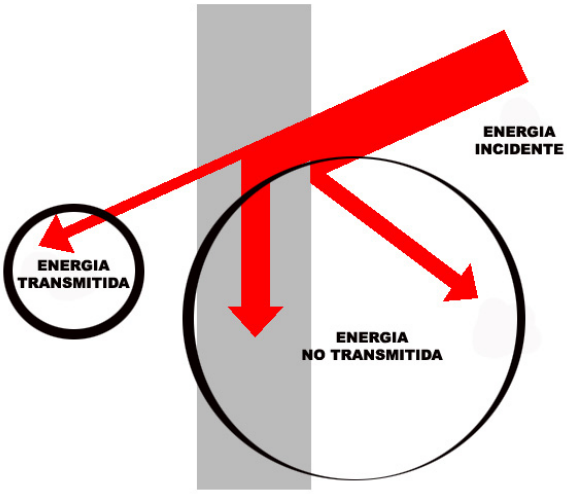


La reverberación

El problema de la reverberación describe la participación de un local (sus paredes y los objetos que contiene) al campo sonoro que se establece cuando se produce un ruido en él.

Cada vez que este ruido encuentra en su propagación algún obstáculo, una parte de su energía se refleja y sigue recorriendo el local. El resto se considera “absorbido”, sea porque se ha transformado en calor (absorción propiamente dicha), sea porque, al atravesar el obstáculo, ha salido del local. En general, se puede considerar que esta energía transmitida ya no partcipa de la reverberación, y, por lo tanto, se la asimila a la energía absorbida.

En cuanto a la reverberación, una pared queda por lo tanto descrita por el porcentaje del sonido que en ella se refleja. Este porcentaje depende principalmente del tipo de material que recubre esta pared, cuyo comportamiento acústico se califica mediante un "coeficiente de absorción".



El aislamiento

El problema del aislamiento describe la relación acústica entre un local y el mundo exterior.

Si se emite un ruido dentro del local, una parte de este ruido se va a transmitir hacia fuera, a través de las paredes. El porcentaje de energía transmitida por esta pared depende esencialmente de su espesor y del material que la constituye.

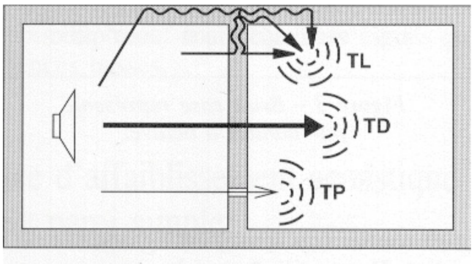
En general, este porcentaje es el mismo, que el sonido vaya desde dentro hacia fuera o desde fuera hacia dentro.

En cuanto al aislamiento, una pared se califica mediante un "factor de reducción".

El siguiente texto describe esencialmente el problema del aislamiento. En realidad, el aislamiento l no está del todo desvinculado de la reverberación, razón por la cual, en determinado momento, se habrá de introducir al problema de la reverberación, para completar el estudio del aislamiento.

5. Ley de las masas

Cuando se emite un ruido en un local, se puede transmitir a un local vecino por tres vías:



- por la pared de separación (transmisión *directa*)
- por las paredes relacionadas con esta (transmisión *indirecta*, o *lateral*)
- por diversos accidentes debidos, por ejemplo, al paso de canalizaciones o a defectos de ejecución (transmisión *parásita*).

El problema resultante es el del *aislamiento.*

Su componente principal es la *reducción acústica* de la pared de separación, expresada por el factor R., definido por:

$$\mathbf{R(dB) = 10 \log \frac{W_i}{W_t}}$$

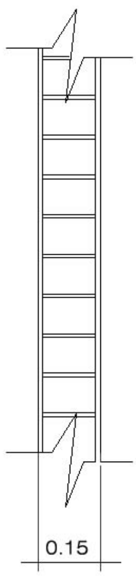
donde W_i representa la potencia acústica incidente en la pared y W_t la potencia acústica transmitida. Así, una reducción de 40 dB significa que un sonido de 100 dB emitido en el primer recinto se oirá en el segundo como si fuera de 60 dB. Sin embargo, el índice R sólo califica una pared. Si, como suele suceder, el sonido tiene otras vías de transmisión (a través del techo, de una puerta, de otras paredes), el aislamiento total puede ser mucho menor.

El factor *R* puede medirse directamente en laboratorio, donde se evitan las transmisiones laterales y accidentales, o indirectamente y de manera aproximada, en condiciones reales, con evaluación anterior de las mismas.

También puede evaluarse por cálculo, conociendo las dimensiones de los locales y la masa volúmica del material, de la cual puede deducirse la masa superficial de la pared.

***Ejemplo*:** la masa superficial de una pared de 18 cm de espesor constituida de hormigón con masa volúmica de 2300 kg/m^3 es:

2300 x (18/100) = 414 kg/m^2

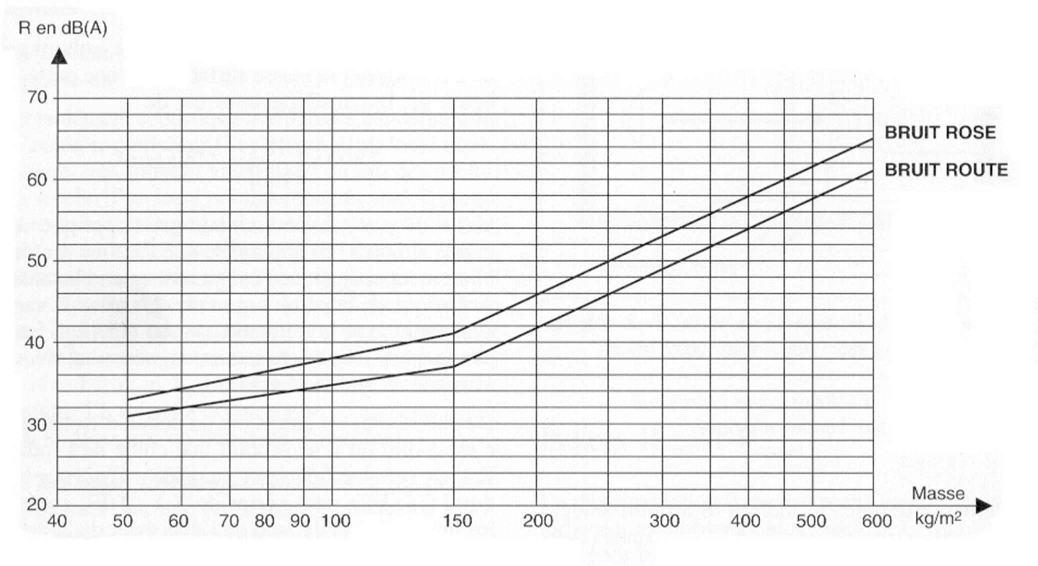


<u>Paredes simples</u>

Ley de las masas para un ruido rosa:
- para $50 \leq m_s < 150$ kg/m^2: R = (17 log m_s) + 4
- para $150 \leq m_s \leq 700$ kg/m^2: R = (40 log m_s) – 46
- para $m_s > 700$ kg/m^2, el valor de R se queda a 68 dB(A)

Ley de las masas para un ruido de tráfico:
- para $50 \leq m_s < 150$ kg/m^2: R = (13 log m_s) + 9
- para $150 \leq m_s \leq 670$ kg/m^2: R = (40 log m_s) – 50

- para $m_s > 670$ kg/m^2, el valor de R se queda a 63 dB(A)
En ambos casos, si $m_s < 50$ kg/m^2, el valor de R debe determinarse en laboratorio.



Valores de masa volúmica:

- hormigón pesado, paredes verticales:	2300 kg/m^3
- hormigón pesado, superficies horizontales:	2400 kg/m^3
- bloque lleno (hormigón, arena, gravilla):	2000 kg/m^3
- bloque perforado (hormigón, arena, gravilla):	1600 kg/m^3
- bloque hueco (hormigón, arena, gravilla):	1300 kg/m^3
- ladrillo lleno:	1850 kg/m^3
- ladrillo hueco con 55% de vacío:	845 kg/m^3
- ladrillo hueco con 60% de vacío:	750 kg/m^3
- ladrillo hueco con 65% de vacío:	655 kg/m^3
- hormigón celular:	500 kg/m^3
- enlucido de yeso (1 cm de espesor):	10 kg/m^2
- enlucido de cemento (1 cm de espesor):	20 kg/m^2

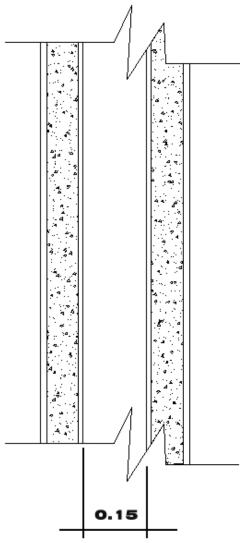
Ejemplo: ¿Cuál es el índice de reducción acústica R_{rosa} en dB(A), para una losa llena de 20 cm de espesor? La masa volúmica de una superficie horizontal se estima a 2400 kg/m^2. Una losa llena de 20 cm de espesor tiene por lo tanto una masa superficial de:

$$2400 \text{ x } (20/100) = 480 \text{ kg/m}^2$$

La masa superficial estando entre 150 y 700 kg/m^2, se aplica la fórmula:

$$R_{rosa} = (40 \log m_s) - 46 = 61 \text{ dB(A)}$$

Paredes dobles

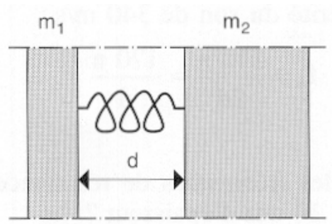


Las paredes dobles aíslan generalmente mucho mejor que las paredes simples construidas con el mismo material y presentando la misma masa superficial.

Existen sin embargo notables excepciones. Así:

	m_s *en kg/m²*	R_{rosa} *en dB(A)*	$R_{tráfico}$ *en dB(A)*
Cristal de 8 mm:	20	31	30
Doble acristalamiento 4-6-4	20	30	27

Es que, en el caso de paredes dobles, el índice R depende de la masa superficial de ambas paredes, del espesor de la lámina de aire que las separa, del espesor del absorbente acústico (tipo lana mineral) dispuesto entre ellas y de la frecuencia crítica de ambas.

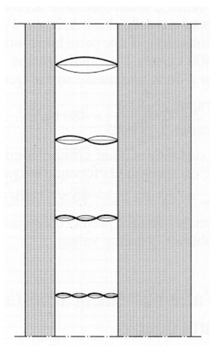


a) Los dos primeros parámetros caracterizan un sistema mecánico masa-muelle-masa, como si las dos paredes estuvieran unidas por un muelle.

Tal conjunto tiene una frecuencia propia y, si se somete una de las paredes a una vibración de misma frecuencia, el sistema entra en resonancia.

$$\mathbf{f_r = 84\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)}}$$ donde *d* se expresa en metros, m_1 y m_2 en kg/m².

Ejemplo: ¿cuál es la frecuencia de resonancia de un doble acristalamiento 4-6-4? Siendo la masa volúmica del vidrio de 2500 kg/m³, la masa superficial de un cristal de 4mm es:



2500 x (0.4/100) = 10 kg/m2. $\Rightarrow f_r = 84 \sqrt{(1/0.006\ (1/10+1/10))} = 485$ Hz

Esta frecuencia, alrededor de la cual R disminuye fuertemente está en las frecuencias medias, las más perceptibles por el oído humano; es una de las razones por la cual esta doble pared es menos eficaz que la pared simple correspondiente.

Para aumentar R, hay que buscar la frecuencia de resonancia más baja posible, lo cual se consigue aumentando la distancia entre las paredes y su masa superficial.

b) La formación de ondas estacionarias en el interior de la lámina de aire perturba también el índice R: Las frecuencias de resonancia de la lámina son:

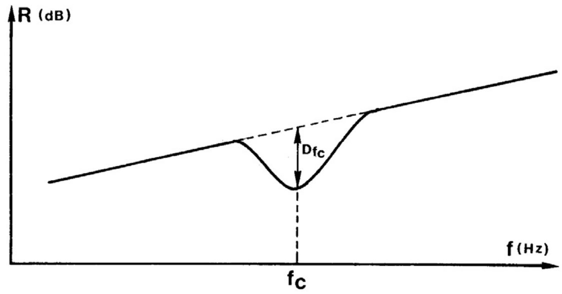
$f_n = \frac{nc}{2d} \approx 170$ n/d, donde *c* es la velocidad del sonido ($\approx$ 340 m/s), *d* la distancia entre las paredes y *n* vale 1,2,3,4,etc.

Ejemplo **:** las frecuencias de resonancia de una lámina de aire de 10 cm de espesor son $f_n = 170$ n/0.10 = 1700 n. Estas frecuencias se ubican a 1700, 3400, 5100, 6800 Hz...

Hay que echar estas frecuencias hacia los agudos, disminuyendo la distancia entre las paredes. Siendo este requisito contradictorio con el anterior, especialmente para paredes ligeras, se recomienda disponer un material absorbente entre ambas paredes.

c) El absorbente acústico, tipo lana mineral, ofrece dos ventajas: amortigua las ondas estacionarias y aumenta *R* para todas las frecuencias.

d) Cada pared tiene una frecuencia crítica f_c, para la cual R disminuye de modo más o menos importante. Si las dos paredes son idénticas, las frecuencias críticas son iguales también, y la caída de R se ve muy acentuada. Se recomienda por lo tanto utilizar paredes dobles con elementos de distinto espesor.



N.b: La disminución máxima de R, en la frecuencia crítica, es de unos 5 dB para los materiales con pérdidas internas elevadas (corcho, goma,...), de unos 8 dB para los materiales con pérdidas internas medias (hormigón, madera,...) y de unos 10 dB para los materiales con pérdidas internas débiles (acero, vidrio, aluminio,...). El aumento del espesor de la pared desplaza esta frecuencia crítica, llevándola hacia las bajas frecuencias.

<u>Paredes compuestas</u>

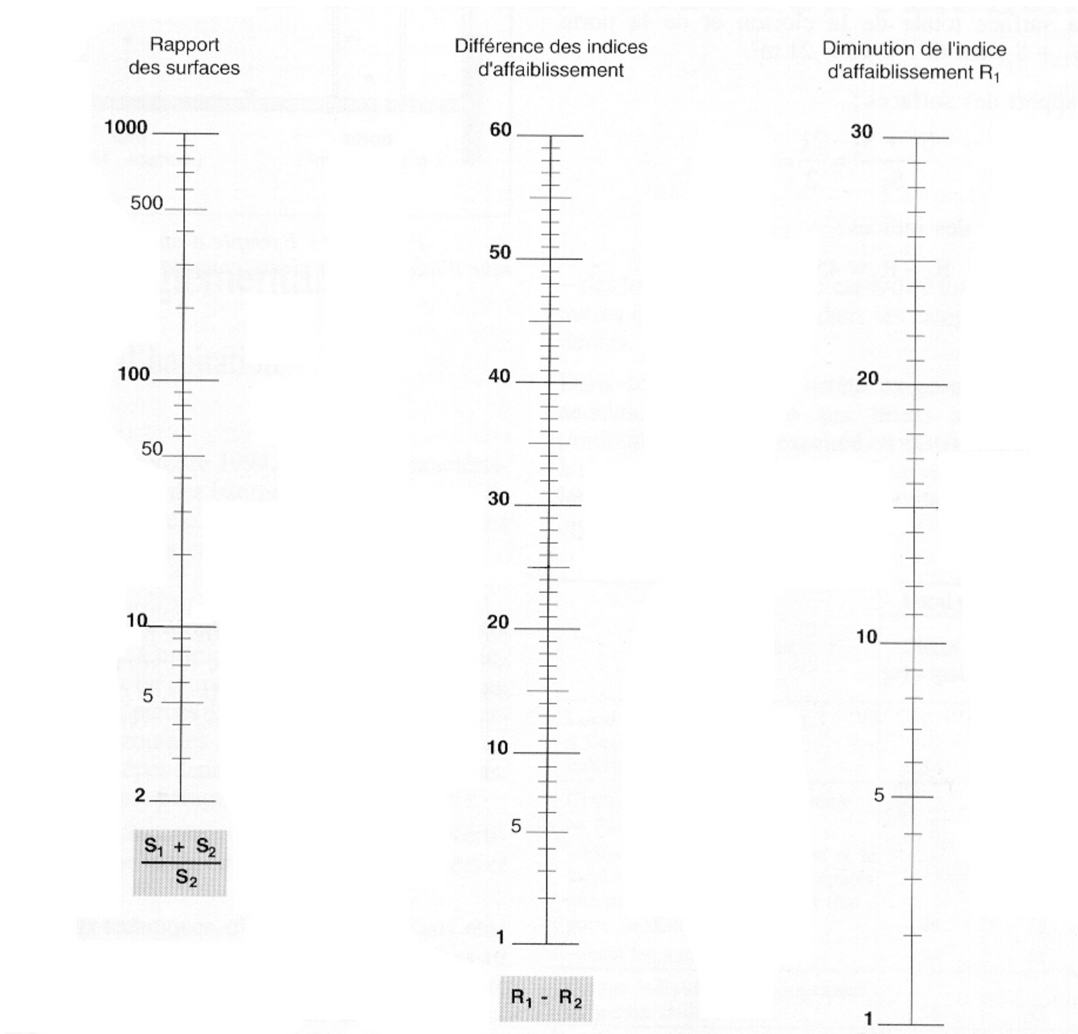
Una superficie suele componerse de varios elementos, como, por ejemplo, una puerta en una pared separando dos locales. El índice R resultando de la composición de los dos índices implicados se calcula así:

$$R_{res} = 10 \log \frac{S_1 + S_2}{S_1\ 10^{-0.1R_1} + S_2\ 10^{-0.1R_2}}$$, donde:

S_1 y S_2 son las superficies, en m^2, de cada componente,

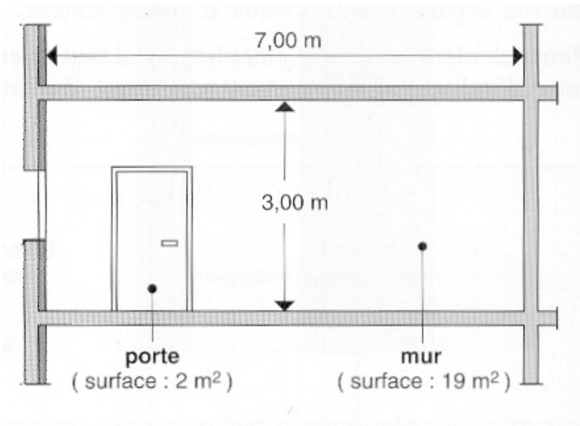
R_1 y R_2 son los índices de reducción, en dB o dB(A), de cada componente.

También se puede utilizar el gráfico siguiente, dando la disminución del índice R más elevado en función de la relación entre las superficies y de la diferencia entre ambos índices R:



Ejercicio 5:

a) Dos salas de clase están separadas por una pared de 7 por 3 metros, incluyendo una puerta de comunicación de 2 m^2. Los índices R de la pared y de la puerta son, respectivamente, de 45 y 20 dB(A). ¿Cuál es el índice R resultante?



b) *Una transmisión parásita:*

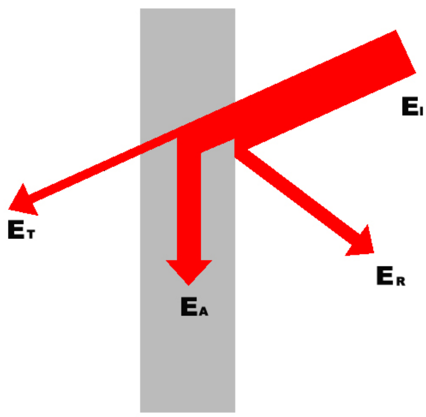
Suponemos un muro en perpiaños llenos de 20 cm de espesor, no enlucidos, es decir teniendo, según la ley de masa experimental, un índice de reducción R_{rosa} de 58 dB(A). Su superficie es de 10 m^2 y presenta una cierta cantidad de agujeros, debidos a malas juntas, con una superficie total de 100 cm^2 (es decir 0.01 m^2). Por definición, el índice R de estos vacíos es igual a 0 dB(A).

¿Cuál es el índice R_{rosa} resultante?

Si enlucimos este muro en, por lo menos, una de sus superficies, los agujeros se colman y R = 58 dB(A). Comparar con el resultado anterior.

6. La absorción

Hasta ahora, al estudiar el encuentro de una onda sonora con una pared del recinto donde se emitió, sólo hemos contemplado la parte transmitida a través del obstáculo. Hay que notar que esta fracción de la energía incidente (E_I) es escasa, o muy escasa. Así, en las frecuencias medias, menos de 1/1000 de la energía incidente se transmite a través de un cristal simple, y menos de 1/1 000 000 a través de una pared de hormigón de 18 cm de espesor. Una parte mayor es absorbida por la pared (E_A) y otra parte se refleja hacia el interior del recinto (E_R). Cuando se considera la situación en este recinto, la energía transmitida se asocia a la energía absorbida, ya que estas dos fracciones están perdidas para el campo sonoro interior, de modo que $E_I = E_A + E_R$.



El coeficiente de absorción de la pared se define como:

$\alpha = E_A/E_I = 1 - E_R/E_I$

Así, si esta pared absorbe 60% de la energía incidente – o sea que refleja 40% de la misma -, su coeficiente de absorción es $\alpha = 0.6$. Por lo tanto, este coeficiente puede variar entre $0 < \alpha \leq 1$, desde una pared totalmente reflectora, a una pared perfectamente absorbente. Su valor depende del material de la pared y varía con la frecuencia del sonido incidente.

Frecuencia (Hz):	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Pared de hormigón pintado[1]:	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Enlucido de yeso pintado[2]:	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Cristal (ventanas)[1]:	0.2	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Cristal[2]:	0.25	0.20	0.15	0.10	0.04	0.02
Tapiz de lana (en paredes)[2]:	0.05	0.10	0.20	0.30	0.35	0.45
Puerta de madera[1]:	0.30	0.20	0.20	0.10	0.07	0.04
Paneles de madera fina[3]	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06	
Suelo de baldosas[2]:	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Suelo de plástico[1]:	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
Moqueta Espesa[1]:	0.05	0.10	0.25	0.40	0.40	0.40
Moqueta de lana alta[2]:	0.15	0.30	0.45	0.45	0.45	0.50
Suelo ocupado con sillones blandos[2]:	0.45	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60
Sillas cubiertas de cuero sin ocupantes[3]	0.12	0.20	0.28	0.34	0.34	
Público y orquesta[3]	0.39	0.57	0.80	0.94	0.92	
Cortinas[3]	0.06	0.31	0.44	0.80	0.75	
Placas perforadas (metal + lana mineral)[4]	0.60	0.74	0.69	0.70	0.75	
Placas perforadas (madera + lana mineral)[4]	0.37	0.8	1.02	0.82	0.58	

EJEMPLOS:

Referencias:

(1) "Réussir l'acoustique d'un bâtiment", L. Hamayon, ed. Le Moniteur, Paris, 1996
(2) "L'acoustique du bâtiment par l'exemple", M. Meisser, ed. Le Moniteur, Paris, 1994
(3) "Auditorium Acoustics and Architectural Design", M. Barron, ed. E&FN Spon, 1993
(4) Ejemplos de materiales acústicos que ofrecen una absorción selectiva en las bajas frecuencias, donde los valores de absorción dependen mucho del espacio entre la placa perforada y el muro o el techo.

Nótense las discrepancias entre las diferentes fuentes: los coeficientes varían según las condiciones de medida del laboratorio, la calidad del material, su espesor, su superficie, el modo de colocación,... Sólo se deben tomar a modo indicativo...

Ejercicio 6:

¿Cuáles son los materiales que absorben mejor las frecuencias graves / agudas? ¿Porqué?

7. La reverberación

El sonido emitido en un local se refleja sobre las superficies del recinto. Si se corta la fuente de emisión, el ruido permanece un tiempo, alimentado por estas reflexiones atrasadas, y se apaga lentamente. Este fenómeno se llama "reverberación". El tiempo de reverberación es el tiempo tras el cual, una vez apagada la fuente de emisión, el sonido ha disminuido de 60 dB, es decir hasta la 1/1 000 000 parte de su energía inicial. La reverberación será tanto más importante cuanto el volumen del recinto sea importante y sus superficies lisas y pesadas. Es lo que expresa la fórmula de Sabine:

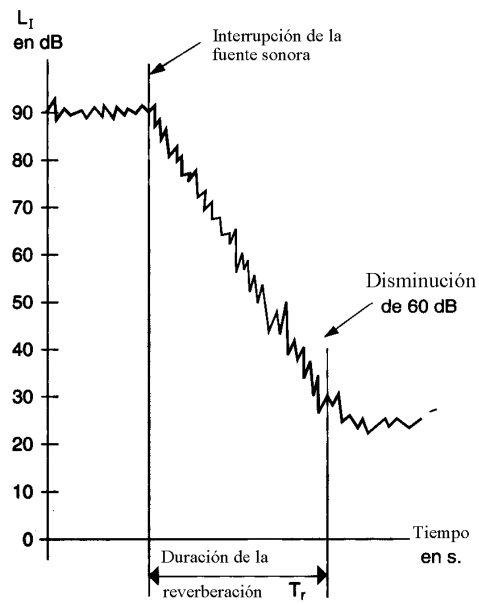
$$T_R = 0.16\frac{V}{A}$$

donde T_R es el tiempo de reverberación (en segundos), V el volumen del local (en m^3) y A el área de absorción equivalente (en m^2):

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + ... + S_n\alpha_n,$$

donde S_i es una de las *n* superficies del recinto y α_i su coeficiente de absorción.

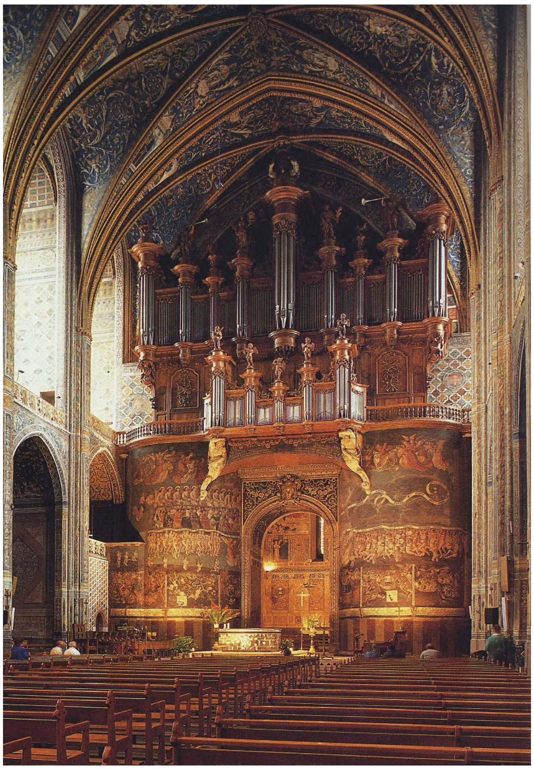
Esta fórmula da resultados aceptables si el reparto de los absorbentes es homogéneo y si los coeficientes de absorción son débiles. Existen decenas de otras fórmulas, pero esta tiene la ventaja de ser la que se usa en las medidas normalizadas de los laboratorios.

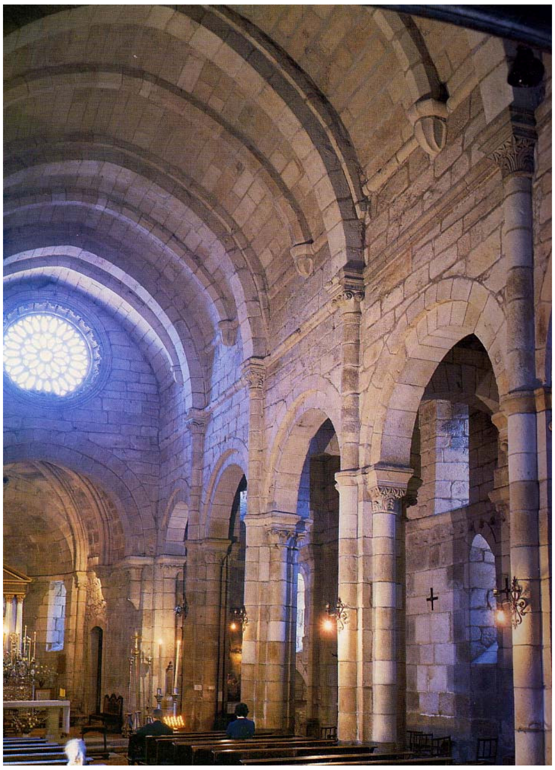


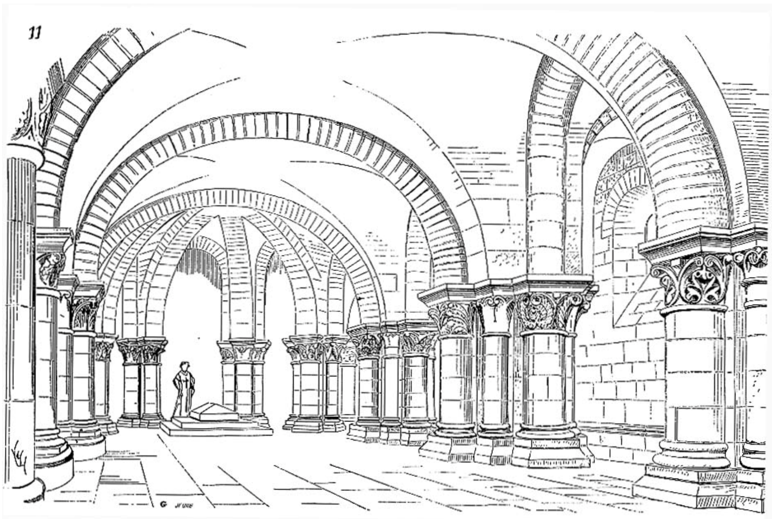
En particular, la fórmula de Sabine se utiliza para medir los coeficientes de absorción: se coloca una superficie determinada del material por estudiar en una cámara reverberante y se compara el tiempo de reverberación medido con el valor del mismo parámetro cuando la cámara está vacía; luego, se utiliza la fórmula de Sabine para calcular el coeficiente α del material.

Un defecto notable de la fórmula es que no toma en cuenta la ubicación del material. La siguiente figura muestra que la misma cantidad de un material absorbente, según dónde se coloca, produce condiciones acústicas muy diversas. Sin embargo, la fórmula de Sabine da en cada caso el mismo valor...

EJEMPLOS DE LUGARES CON MUCHA REVERBERACION:

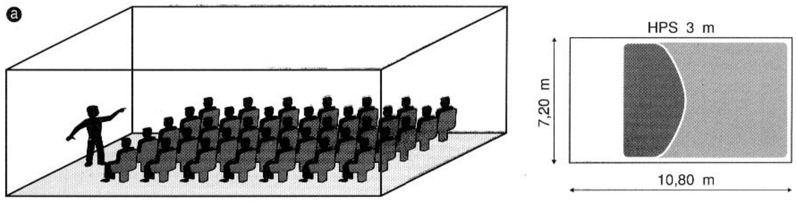




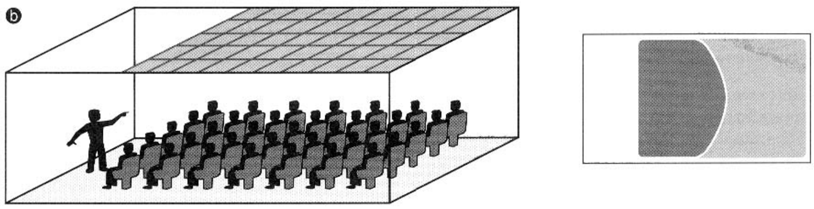


TRATAMIENTO ACUSTICO DE UN AULA

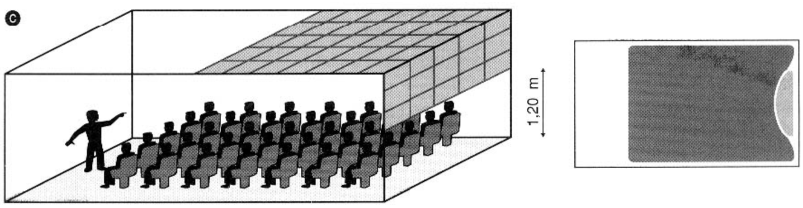
DISTRIBUCION DE LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA EN UN AULA OCUPADA, EN FUNCION DE LA DISPOSICION DEL TRATAMIENTO ACUSTICO



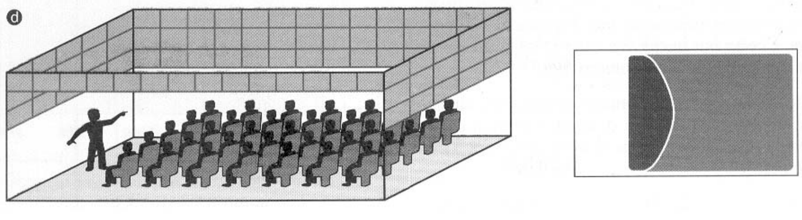
A) AULA SIN MATERIAL ABSORBENTE



B) AULA CON DOS TERCIOS DEL TECHO TRATADO CON UN MATERIAL



C) LA MISMA SUPERFICIE DE ABSORBENTE ESTA REPARTIDA EN EL TECHO Y EN LA PARED DE FONDO, A PARTIR DE UNA ALTURA DE 1.20 MTS



D) LA MISMA CANTIDAD DE ABSORBENTE ESTA REPARTIDO SOBRE LAS PAREDES VERTICALES DISPONIBLES. EL TECHO NO RECIBE TRATAMIENTO

Ejercicio 7:

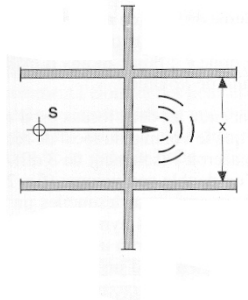
Sea un local de 5 metros por 4 y de 2.50 metros de altura, cuyo techo tiene un coeficiente de absorción de 0.4 a 1000 Hz y cuyas otras superficies tienen un coeficiente de 0.05 a la misma frecuencia.

¿Cuál es la duración de la reverberación del local a 1000 Hz? ¿Qué deviene si 15 m^2 del suelo están ocupados por un público presentando un coeficiente $\alpha = 0.8$?

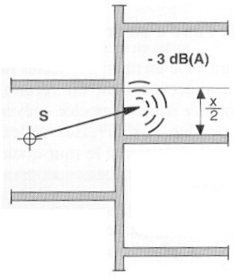
8. El aislamiento

Para estudiar el aislamiento acústico entre dos locales, hay que considerar, además de las transmisiones directas ya estudiadas (índice R), las transmisiones laterales y parásitas, y la reverberación en el local de recepción.

a) Las transmisiones directas:

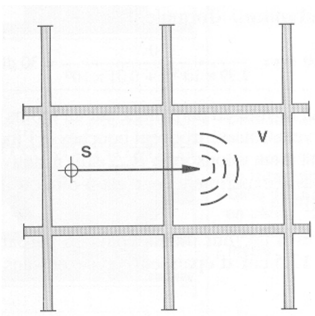


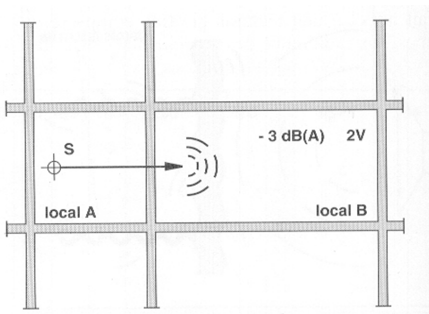
La *superficie* de la pared de separación interviene de manera importante en el aislamiento. Por ejemplo, si dos locales están separados por una pared de 10 m^2, una cierta cantidad de sonido la atraviesa. Si estos dos locales estuvieran separados por una superficie de sólo 5 m^2, la energía que la atravesaría sería dos veces menos importante, y el ruido disminuiría de 3 dB.



Más el *volumen* del local de recepción es importante, más la energía acústica atravesando la pared de separación se "diluye"; por lo tanto, menos hay energía por unidad de volumen.

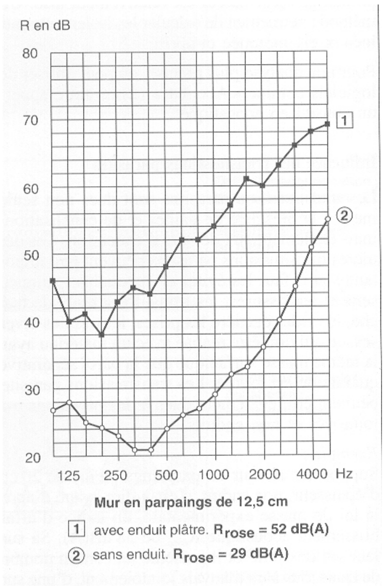
El aislamiento entre dos locales es tanto más importante cuanto el volumen del local de recepción es grande. El aislamiento crece de 3 dB cada vez que se duplica su volumen: es una de las razones por las cuales un aislamiento no suele ser simétrico. El aislamiento de un local A con respecto a un local B no es el mismo que el aislamiento del local B con respecto al local A.





Un sonido que atraviesa una pared se refleja sobre las otras paredes de la pieza durante un cierto tiempo. Esta energía de reverberación se suma a la que sigue atravesando la pared, con un atraso de algunos décimos de segundo.

Más los locales tienen muebles, moquetas, cortinas y otros materiales absorbentes, mejor es el aislamiento, ya que la energía atravesando la pared es absorbida en vez de contribuir a la reverberación. Sin embargo, como no suele saberse cómo se amoblarán los pisos o los locales de enseñanza, se considera, por convención, una reverberación de 0.5 s.



b) Las transmisiones parásitas.

Se deben a canalizaciones, intersticios,... o a defectos de ejecución, que pueden producir pérdidas muy importantes, como se vio anteriormente.

La siguiente ilustración muestra un caso parecido al ejercicio 5b: la curva 2 muestra el factor de reducción de un muro de perpiaños sin enlucido, y la curva 1 muestra cómo este factor puede mejorar con sólo enlucir la pared.

c) Las transmisiones laterales

Estas transmisiones son a menudo más importantes que las transmisiones directas. La energía pasando por paredes laterales unidas a una pared de separación pesada es tanto más importante cuanto las paredes laterales son ligeras y rígidas.

Estas transmisiones son las más difíciles de prever; pueden significar una caída *a* del aislamiento de entre 0 y 10 dB.

Se suele usar la fórmula $a = 5 + S_r/10 - N$, donde:

- S_r es la superficie en el local de recepción de las paredes laterales y rígidas (tabiques $\leq$ 100/kg/m^2). Se les asimila las paredes dobles presentando hacia el local de recepción un complejo de refuerzo térmico perjudicial para el aislamiento acústico, como las placas de yeso y polistireno.
- N es el número de paredes laterales protegidas acústicamente en su unión con la pared de separación.

- Si las paredes laterales y la pared de separación son pesadas (más de 150 kg/m^2) y unidas rígidamente entre sí, a ≈ 5 dB(A).
- Si las paredes laterales ligadas a la pared de separación pesada son ligeras y rígidas (baldosas de yeso,...), a ≈ 5 + 1.5 n dB(A), donde n es el número de paredes ligeras de 7 a 10 m^2 ligadas a la pared de separación.
- Si las paredes laterales son muy ligeras (placas de yeso,...), a ≈ 5 a 6 dB(A).

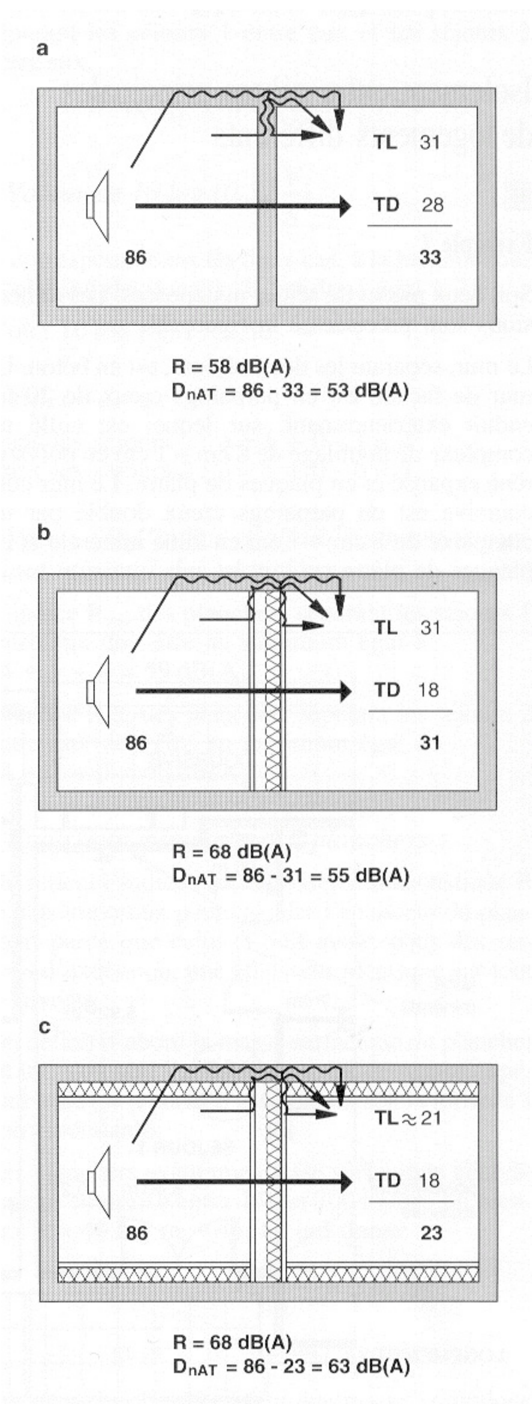
El ejemplo siguiente muestra los límites de aplicación del método.

Suponemos una estructura homogénea de hormigón de 18 cm de espesor. En este caso, el factor *a* vale 5 dB(A). Para simplificar, suponemos un local de recepción con una reverberación de 0.5 segundos y una profundidad de 3 metros: en este caso, como se verá a continuación, el aislamiento vale simplemente: D = R – a.

El índice R de un muro de hormigón de 18 cm vale 58 dB(A). Por consiguiente, el aislamiento es de 53 dB(A). Así, si el nivel sonoro a la emisión es de 86 dB(A) (ruido rosa de 80 dB por banda de octava), el nivel sonoro en el local de recepción es de 33 dB(A). Al no existir transmisiones laterales, sería de 28 dB(A). Para conocer el aislamiento que sólo consideraría las transmisiones laterales, hay que recurrir a la fórmula:

$$D_l = -10 \log (10^{-0.1 D} - 10^{-0.1 D_d}),$$

donde D = 53 dB(A) y D_d = 58 dB(A). Se obtiene D_l = 55 dB(A). Se obtienen así los datos de la figura (a).



Si aumentamos la eficacia de la pared de separación en 10 dB(A) (empleando una pared simple de hormigón de 30 cm o una pared doble con un índice R de 68 dB(A)), obtenemos: D = 68 – 5 = 63 dB(A). En realidad, el aislamiento vale 55 dB(A), como lo indica la figura (b), ya que las transmisiones laterales apenas cambiaron. El método simplificado causa por lo tanto un error importante de 8 dB(A).

Para aumentar el aislamiento, habría que mejorar la eficacia de las paredes laterales, como lo indica la figura (c).

d) El aislamiento

El *aislamiento bruto* D_b se define como la diferencia entre los niveles sonoros en el local de emisión y el local de recepción.

$$D_b = R + 10 \log \frac{V}{S} - 10 \log T - a - 8 \text{, donde}$$

- R es el índice de reducción acústica de la pared de separación
- V es el volumen del local de recepción en m^2
- S es la superficie de la pared de separación
- T es el tiempo de reverberación en el local de recepción
- a representa las transmisiones laterales.

Esta fórmula es válida si las transmisiones directas nos son despreciables con respecto a las transmisiones indirectas. La cantidad V/S se asimila a la profundidad *d* del local de recepción si este tiene forma rectangular.

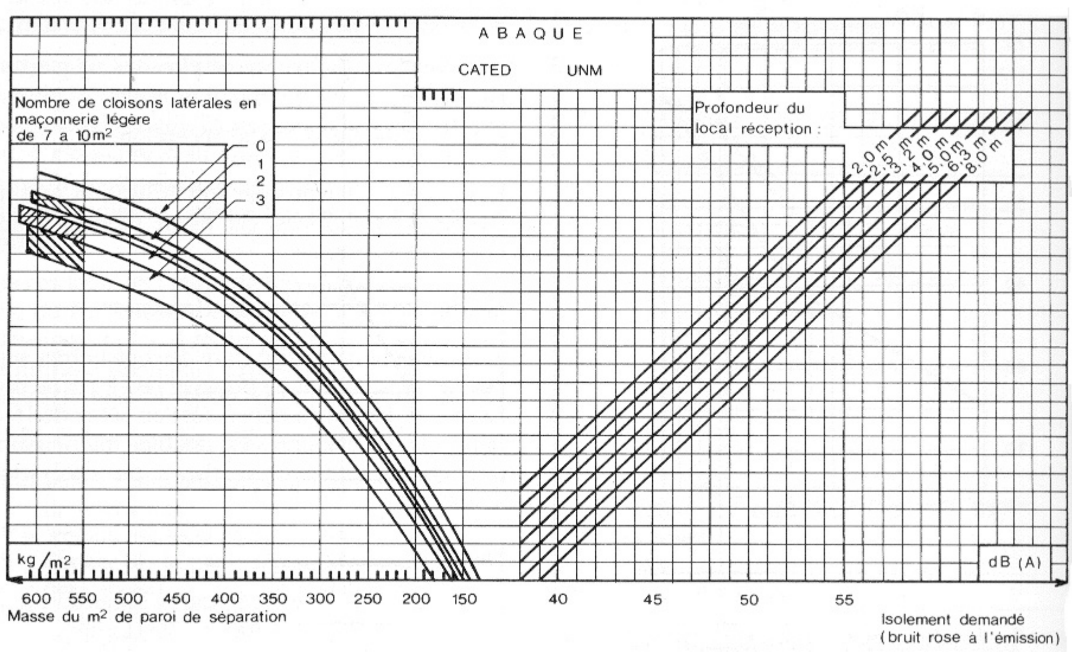
El *aislamiento normalizado* es:

$D_n = D_b + 10 \log T/0.5$

EJEMPLOS:

e) El ábaco de previsión

El CATED (Francia) ha propuesto un ábaco para facilitar la evaluación del aislamiento, en el caso corriente de paredes de separación pesadas con tabiques laterales ligeros y rígidos.

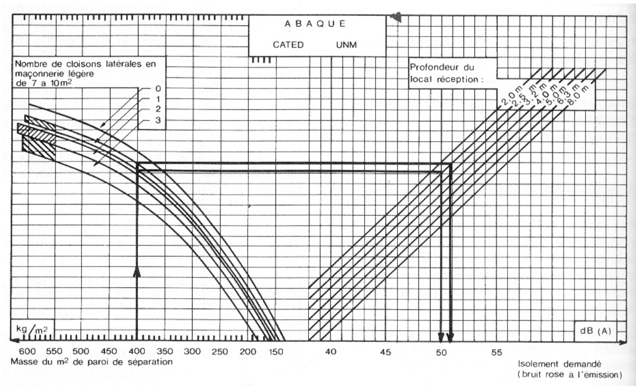


Ejemplo: se busca el aislamiento normalizado entre dos habitaciones superpuestas, separadas por un forjado de 18 cm de hormigón (2300 kg/m^3). Los muros son de hormigón de 16 cm. La fachada de las habitaciones presenta en el interior un complejo de aislamiento térmico "polistireno + yeso".

En este caso:

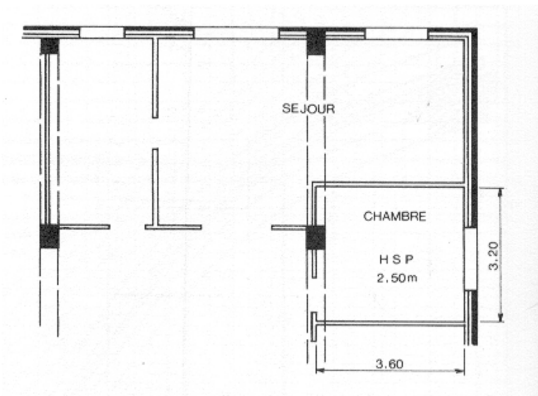
- masa superficial de la pared de separación: $m = 0.18 \times 2300 \approx 400$ kg/m^2
- número de tabiques: n = 1
- profundidad del local: d = 2.50 m.

El ábaco muestra que D_n estará comprendido entre 50 y 51 dB(A). Las mediciones han dado un resultado de 50 dB(A) en un caso, y de 52 dB(A) en otro caso del mismo edificio.



Ejercicio 8

Dos habitaciones superpuestas, de 2.5 metros de altura, con forjado de hormigón de 17 cm de espesor (2300 kg/m^3), paredes de tabique (incluso en la fachada, por el refuerzo térmico), con una puerta de 2 m^2 y una ventana de 1.5 m^2 (a retirar de la superficie de tabique). El aislamiento medido es de 46.6 dB(A). Compararlo con la evaluación del ábaco.



Referencias:

"Auditorium Acoustics and Architectural Design", M. Barron, ed. E&FN Spon, 1993
"L'acoustique du bâtiment par l'exemple", M. Meisser, ed. Le Moniteur, Paris, 1994
"Réussir l'acoustique d'un bâtiment", L. Hamayon, ed. Le Moniteur, Paris, 1996

La ilustración de la primera página es un dibujo de Leonardo da Vinci : « teatro para oír misa », copiado de « Architecture et musique », M. Forsyth, ed. Mardaga, 1987.