Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Tema 10: Aislamiento

- **Aislamiento, magnitudes básicas.**
- **Aislamiento frente a un espectro.**
- **Aislamiento, normativa.**
- **Aislamiento, normativa CTE-DB-HR.**
- **Aislamiento de particiones complejas.**
- **Propagación por flancos.**
- **Efecto de rendijas.**
- **Ley de la masa.**
- **Consideraciones generales**
- **Aislamiento. Ejercicio.**
- **Normas españolas de aislamiento en viviendas**
- **Nivel máximo en los interiores**

Antonio Lecuona Neumann
José Ignacio Nogueira Goriba

Aislamiento, magnitudes básicas

- Es la pérdida de energía de las ondas acústicas al atravesar una partición.
- Parámetros de evaluación:

Pérdida por transmisión (*Transmission Loss TL o* τ) : cociente entre la potencia incidente $_{in}$ y la transmitida $_{t}$, que es función de la naturaleza de la partición, generalmente en dB:

$$\underbrace{TL}_{R} = 10\log\frac{W_{in}}{\underbrace{W_t}_{1/\tau}} = 10\log\frac{W_{in}/W_{ref}}{W_t/W_{ref}} = \underbrace{NP_{in}}_{L_{win}} - \underbrace{NP_t}_{L_{wt}} > 0$$

Suele medirse:

- A una frecuencia fija $\Rightarrow$ solo función de *f*.
- Globalmente $\forall\, f \Rightarrow$ función del espectro del sonido.

En la práctica interesa el nivel acústico que se obtiene en un local $NPS_{receptor}$ cuando en el vecino (o en el espacio abierto) hay un cierto nivel acústico $NPS_{emisor,}$ definiéndose un **aislamiento** o **reducción de ruido *R***:

$$\underbrace{R}_{D} = 10\log\frac{I_{emisor}}{I_{receptor}} = 10\log\frac{I_{emisor}/I_{ref}}{I_{receptor}/I_{ref}} = \underbrace{\underbrace{NPS_{emisor}}_{L_{p,emisor}=L_1} - \underbrace{NPS_{receptor}}_{L_{p,receptor}=L_2}}_{>0} \quad (\%)$$

¡*NPS* depende no solo de la potencia transmitida, sino de la absorción del local receptor!. I_{in} sustitute a I_{emisor} si el campo no es difuso.

– Para la potencia incidente en la partición de área $S_{in} = S_t$, se asume que $I_{in} = I_{emisor}$, luego es $W_{in} = I_{in}S_t$. La potencia absorbida en el recinto receptor es $I_2 A$ **(campo difuso)**. En el estado estacionario es igual la transmitida, luego:

$$TL = 10\log\frac{W_{in}}{W_t} = 10\log\frac{I_1 S_t}{I_2 A} = R + 10\log\frac{S_t}{A} \Rightarrow \boxed{R = TL - 10\log\frac{S_t}{A}}$$

Aislamiento frente a un espectro

- La potencia transmitida es la suma de las N potencias en cada banda disjunta $_i$:

$$NP_t = 10\log\left(\underbrace{\sum_{i=1}^{N} 10^{\overbrace{(NP_{emisor,i}-TL_i)/10}^{NP_{t,i}=NP_{receptor,i}}}}_{W_t/W_{ref}}\right) \qquad (\&\&)$$

- La intensidad global es la suma de las intensidades, que si es ponderada A, con coeficientes A_i, se indica con el subíndice, se asume generalmente $I_{in} = I_{emisor}$:

$$NPS_{receptor,A} = 10\log\left(\overbrace{\sum_{i=1}^{N} \underbrace{10^{\overbrace{(NPS_{emisor,i}+\boldsymbol{A}_i-\boldsymbol{R}_i)/10}^{NPS_{receptor,i,A}}}}_{I_{receptor,i,A}/I_{ref}}}^{I_{receptor,A}/I_{ref}}\right)$$

- La cifra de aislamiento global en un caso real <u>depende pues del espectro incidente</u>. Se acostumbra ponderar con la escala A, resultando un aislamiento "A", para un cierto espectro $NPS_{emisor,i}$ sin ponderación:

$$R_A = 10\log\left(\frac{\overbrace{\sum_{i=1}^{N} 10^{(NPS_{emisor,i}+\boldsymbol{A}_i)/10}}^{I_{emisor,A}/I_{ref}}}{\underbrace{\sum_{i=1}^{N} 10^{(NPS_{emisor,i}+\boldsymbol{A}_i-\boldsymbol{R}_i)/10}}_{I_{receptor,A}/I_{ref}}}\right) > 0 \qquad (\%\%)$$

Aislamiento, normativa *(a título informativo)*

En la normativa española (CTE-DB-HR p. e. http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbhr/):

- Al aislamiento que hemos denominado *R* se le denomina "*aislamiento acústico bruto a ruido aéreo de un recinto respecto de otro*" y se le representa por D_i (de diferencia de niveles) en la banda i.
- A la pérdida por transmisión TL_i:
  - Se le denomina "*aislamiento acústico específico de un elemento constructivo*", se le representa por R_i y se obtiene en laboratorio.
  - Se le denomina también "*aislamiento acústico normalizado*", se le denomina R'_i y se obtiene in situ.
- En edificación se usa una única cifra para caracterizar una partición. el "**Índice global de reducción acústica aparente de un elemento constructivo, ponderado A**" que considera un espectro ficticio "**espectro del ruido rosa normalizado ponderado A**" de nivel $L_{rA,i}$.

$$R'_A = -10\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{L_{rA,i} - R'_i}{10}}\right)$$

- i recorre las bandas de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5 kHz, luego N = 18, o en octavas, N = 6.

Aislamiento, normativa CTE-DB-HR *(a título informativo)*

Espectro del ruido rosa normalizado ponderado A en la banda de frecuencia i: $L_{rA,i}$

1/1 Octava		1/3 Octava	
f_i Hz	$L_{rA,i}$ dBA	f_i Hz	$L_{rA,i}$ dBA
125	-22,4	100	-30,1
		125	-27,1
		160	-24,4
250	-14,9	200	-21,9
		250	-19,6
		315	-17,6
500	-9,5	400	-15,8
		500	-14,2
		630	-12,9
1.000	-6,3	800	-11,8
		1.000	-11,0
		1.250	-10,4
2.000	-5,1	1.600	-10,0
		2.000	-9,8
		2.500	-9,7
4.000	-5,3	3.150	-9,8
		4.000	-10
		5.000	-10,5

La norma considera valores máximos para la "Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, para recintos interiores"

$$D_{nT,A} = -10\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{L_{RA,i} - D_{nT,i}}{10}}\right)$$

Donde, la "Diferencia de niveles estandarizada para recintos interiores en la banda i" es:

$$D_{nT,i} = \underbrace{L_1 - L_2}_{D_i} + 10\log\frac{T_i}{0,5\text{s}}$$

Donde la norma toma 0,5 s como tiempo de reverberación estándar $_n$.

Hay otros espectros para ruido exterior, como el de tráfico, aeronaves y ferroviario.

Aislamiento de particiones complejas

1.- Generalizando a una partición compuesta de j = 1, 2 … J elementos disjuntos en paralelo para dar el aislamiento de *superficies mixtas* y asumiendo independencia:

La intensidad incidente I_{in} es la misma para todos los elementos (campo difuso), la transmitida no:

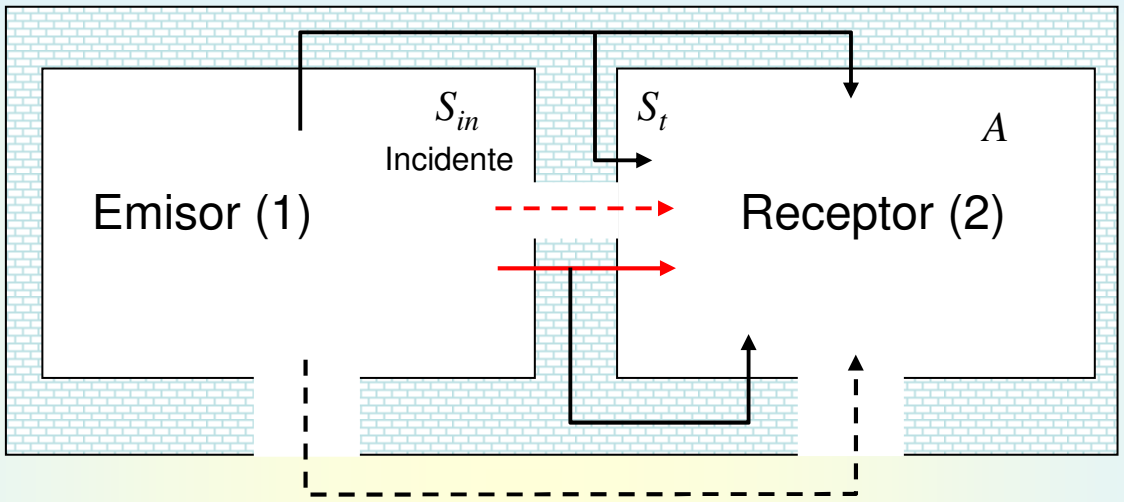
$$\left.\begin{array}{l}\left.\begin{array}{l}\text{Pot. total}\\ \text{incidente}\end{array}\right\} W_{in} = I_{in}\overbrace{\sum_j S_j}^{S_t};\ \left.\begin{array}{l}\text{Pot. total}\\ \text{transmitida}\end{array}\right\} W_t = \sum_j W_{t,j} \qquad (\#)\\ \left.\begin{array}{l}\text{Pérdida por}\\ \text{transmisión}\\ \text{individual}\end{array}\right\} TL_j = 10\log\frac{W_{in,j}}{W_{t,j}}\\ \text{Pot. incidente ind.: } W_{in,j} = I_{in}S_j\end{array}\right\} \Rightarrow W_{t,j} = I_{in}S_j 10^{-\frac{TL_j}{10}} \Rightarrow TL = 10\log\frac{W_{in}}{W_t} = 10\log\frac{\cancel{I_{in}}S_t}{\cancel{I_{in}}\sum_j S_j 10^{-\frac{TL_j}{10}}}$$

$$TL = -10\log\sum_j \frac{S_j}{S_t}10^{-\frac{TL_j}{10}} > 0$$

2.- Generalizando a una partición compuesta de j = 1, 2 … J elementos en serie para dar el aislamiento total, aparecen interacciones, pero si éstas son despreciables, simplemente se agregan los aislamientos individuales, lo cual equivale a multiplicar los $1/\tau_j$:

$$TL = \sum_j TL_j > 0$$

Propagación por flancos



La pérdida por transmisión antes definida puede carecer de precisión al realizar un cálculo usando S_t por:

- **Transmisión por flancos, o indirecta: es la propagación acústica por caminos distintos al camino directo** (transmisión estructural p. e. vibraciones o aérea, p. e. conductos de ventilación, …), pero se pueden tener en cuenta.
- No homogeneidad espacial del campo incidente y transmitido, especialmente notable en recintos de geometría compleja con mucha absorción.

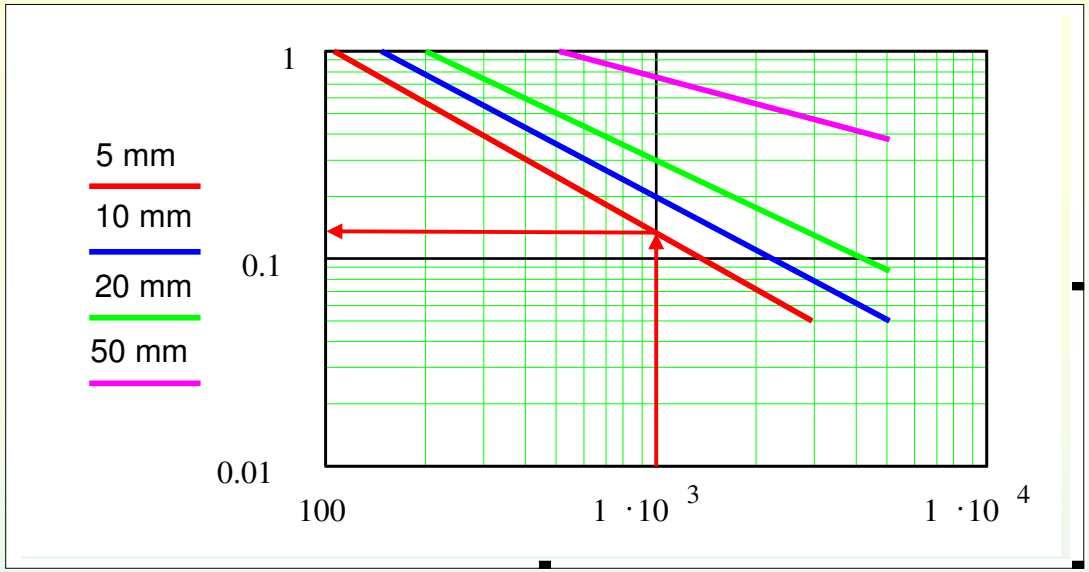
Las líneas rojas muestran la **transmisión directa** (rendijas, orificios, etc.).

En línea sólida la transmisión vía estructural.

En línea de trazos las vías aéreas (ventanas, orificios, conductos de aire acondicionado, conexiones eléctricas, etc.).

} Flancos o indirecta

Efecto de rendijas



τ de la rendija para 3 anchuras, que al ser bajo y en paralelo, reduce el *TL* total.

A bajas frecuencias se nota más el efecto de la rendija de estropear el aislamiento.

Adaptado de: Engineering Noise Control, D. A. Biez & C. H. Hansen, 2ª ed. , 1996 E & FN Spon, London.

- Si la rendija está en un rincón (base de una puerta p. e.) su anchura debe aumentarse por efecto de la reflexión (del suelo).

Ejercicio: Calcular la pérdida de transmisión a 1.000 Hz de una puerta de 2,1×0,9 m y TL = 30 dB, con una apertura de 5 mm a lo ancho de todo su borde inferior. La puerta se encuentra sobre un suelo reflectante.

Solución: se duplica el área, pero no el ancho de la rendija. Aplicando la ec. (#):

$$TL = 10\log\frac{W_{in}}{W_t} = 10\log\frac{\sum_{j=1}^{2} S_j}{\sum_{j=1}^{2} S_j 10^{-\frac{TL_j}{10}}} = 10\log\frac{0{,}9\text{m}\times(2{,}1\text{m}+2\times0{,}005\text{m})}{0{,}9\text{m}\times\left(2{,}1\text{m}\times10^{-\frac{30}{10}}+2\times0{,}005\text{m}\times0{,}14\right)} = 27{,}3\text{dB}$$

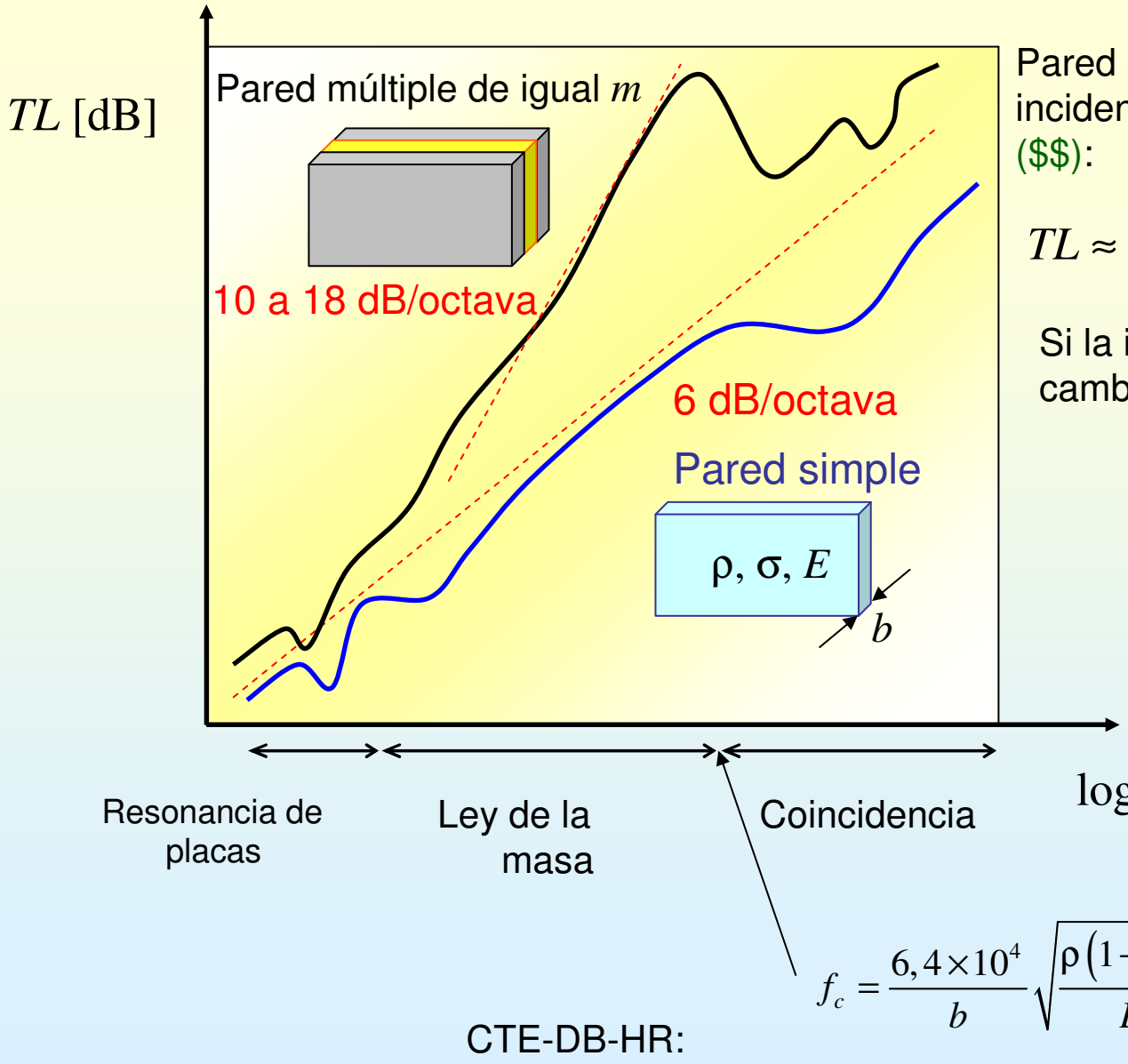
Ley de la masa

- Una primera aproximación para el cálculo del aislamiento es suponer la pared plana infinita, incompresible, pero infinitamente blanda a flexión, sometida a una onda plana en campo libre. Resulta la **ley de la masa**:

$$TL = 10\log\left(1+\frac{\pi^2 f^2 m^2}{\rho_{atm}{}^2 a^2}\right) \approx 20\log\frac{\pi f m}{\rho_{atm} a} \qquad (\$\$)$$

- Se cuadruplica el aislamiento (+6 dB):
  - Al duplicarse la masa p. u. de superficie $m = \rho b$, siendo b el espesor, ρ la densidad del material de módulo de Poisson σ y de elasticidad E.
  - Al duplicarse la frecuencia f (+6 dB/octava).
- Cuando una onda inclinada c. r. a la pared produce vibraciones a flexión cuya longitud de onda coincide con la distancia entre picos de presión sobre la superficie de la pared, se produce la **coincidencia**, que reduce el aislamiento entre 5 dB y 20 dB en lasfrecuencias mayores. La frecuencia de coincidencia suele ser alta y aumenta con m.
- A bajas frecuencias aparece un efecto asimismo reductor, debido a **resonancia de la(s) placa(s)** que forma(n) la pared.
- Los valores de m adecuados para un buen aislamiento resultan exagerados, por lo que se recurre a paredes combinación de materiales masivos y materiales absorbentes en serie → paredes compuestas por múltiples placas (sandwich) llegándose +18 dB/octava. Entre placas puede haber aire o material absorbente.

Ley de la masa (cont.)



Pared simple con incidencia normal, de ec. ($$):

$$TL \approx 20\log(fm) - 42\text{dB}$$

Si la incidencia es difusa cambiar a -47 dB

$$f_c = \frac{6{,}4\times10^4}{b}\sqrt{\frac{\rho\left(1-\sigma^2\right)}{E}}$$

CTE-DB-HR:

Consideraciones generales

- Cuanto más gruesa y densa sea una partición más aísla, por vibrar poco ante el campo acústico. Sin embargo, puede reflejar mucho, afectando a T_{60} del local emisor.
- Un material absorbente de la partición produce aislamiento por absorber la energía incidente. Sin embargo, puede aislar poco por ser muy ligero y poroso.
- Aumentar A en el local receptor reduce NPS en él (acondicionamiento) $\rightarrow$ no afecta al aislamiento, pero reduce el ruido en el local receptor por disminuir I_{in}.
- Aumentar A en el local emisor reduce NPS en él $\rightarrow$ no afecta al aislamiento, pero reduce el ruido en el propio local y en el receptor.

Aislamiento. Ejercicio.

Ejercicio: Sea una puerta de madera con cerco de 75 mm de espesor, cuyo aislamiento es el siguiente:

Frecuencia central (Hz)	**125**	**250**	**500**	**1.000**	**2.000**	**4.000**
TL_i (dB)	31	32	33	29	37	41

Se pide calcular su ***aislamiento global frente al ruido rosa.***

Respuesta: El aislamiento global a estas frecuencias se obtiene calculando:

$$TL = 10\log\left(\frac{N}{\sum_{i=1}^{N}\text{anti}\log\frac{-TL_i}{10}}\right) = 10\log\left(\frac{6}{10^{\frac{-31}{10}}+10^{\frac{-32}{10}}+10^{\frac{-33}{10}}+10^{\frac{-29}{10}}+10^{\frac{-37}{10}}+10^{\frac{-41}{10}}}\right) = 32,4\text{dB}$$

- El aislamiento global TL se usa para dar una cifra única que caracterice al elemento, asumiendo **ruido rosa** incidente. Para demostrar la ecuación anterior partamos de la definición de TL y que $NP_i = cte$:

$$TL = 10\log\frac{W_{in}}{W_t} = 10\log\frac{\overbrace{\sum_{i=1}^{N}10^{\frac{NP_{in,i}}{10}}}^{W_{in}/W_{ref}}}{\underbrace{\sum_{i=1}^{N}10^{\frac{\overbrace{NP_{in,i}-TL_i}^{NP_{t,i}}}{10}}}_{W_t/W_{ref}}} = 10\log\frac{\sum_{i=1}^{N}10^{\frac{NP_{in,i}}{10}}}{10^{NP_{in,i}}\sum_{i=1}^{N}10^{-\frac{TL_i}{10}}} = 10\log\frac{N\,\cancel{10^{\frac{NP_{in,i}}{10}}}}{\cancel{10^{NP_{in,i}}}\sum_{i=1}^{N}10^{-\frac{TL_i}{10}}} = 10\log\frac{N}{\sum_{i=1}^{N}10^{-\frac{TL_i}{10}}}$$

Aislamiento. Ejercicio.

- Esta cifra de TL da excesiva contribución a los valores correspondientes a bajas frecuencias y en menor medida a altas frecuencias:
- Las fuentes de ruido naturales tienen menos contribución a bajas y a altas frecuencias, que a medias y además el oído es especialmente menos sensible a bajas frecuencias (recuérdense curvas isófonas).
- Por ello a menudo, la normativa especifica ponderar el ruido rosa ponderado con la escala A, o bien asume un espectro representativo a efectos del cálculo de un valor global de TL y de R, véase como ejemplo el modo de calcularlo con la NBE-DB-HR.

Normas españolas de aislamiento en viviendas

La norma básica de la edificación (NBE CA 88 obsoleta) era de tipo **prescriptivo**: significando que impone una calidad acústica mínima y ofrece datos y procedimientos de proyecto para cumplirla. Los niveles de aislamiento se obtienen de forma especial.

Esta norma no entraba a exigir un mínimo de protección en sistemas de ventilación, bajantes, capaces de generar ruido y de transmitirlos entre viviendas.

El Código Técnico de la Edificación DB-HR (BOE 25/01/2008) es de tipo **prestacional**.
Es necesario demostrar el aislamiento y los niveles máximos en el interior.

Características:

- Diferencia unos recintos de otros "protegidos" donde los niveles permitidos son menores y el aislamiento mayor.
- El aislamiento acústico de fachadas exigido es tanto mayor cuanto mayor es L_d (determinado por las autoridades públicas) y habrá de aumentarse si predomina el ruido de aeronaves.
- Impone máximos al tiempo de reverberación de algunos recintos promediado entre 500, 1.000 y 2.000 Hz.
- Se limita el ruido de instalaciones (L_p) y vibraciones del techo e instalaciones.
- Para el diseño y dimensionado de los elementos constructivos, puede elegirse una de las dos opciones, **simplificada** (para edificios residenciales, proponiéndose tipos de soluciones constructivas) o **general** (basada en la norma UNE EN 12354).
- Se especifican condiciones para los productos de construcción, condiciones de construcción y condiciones de mantenimiento y conservación.

Nivel máximo en los interiores

Real Decreto 1367/2007 que desarrolla la Ley del Ruido, Ley 37/2003.

Real Decreto 1371/2007 Código Técnico de la Edificación DB-HR de protección frente al ruido, inmisión nivel medio equivalente ponderado A, ± 2 dB, síntesis indicativa.

Uso del edificio	*Recinto*	Máximo nivel $L_{eqA,T}$ de inmisión en dBA (1)	
		Durante el día (7-23 H)	Durante la noche (23-7 H)
Viviendas	Estancias	40	35
	Dormitorio	40	30
	Servicios	50	-
	Zonas comunes	50	-
Residencial público	Zonas de estancia	40	30
	Dormitorios	40	30
	Servicios	50	-
	Zonas comunes	50	-
Administrativo y de oficinas	Despachos profesionales	40	-
	Oficinas	45	-
	Zonas comunes	50	-
Sanitario	Zonas de estancia	45	35
	Dormitorios	30	30
	Quirófanos	30	30
	Zonas comunes	50	40
Docente	Aulas	40	-
	Sala lectura y conferencias	35	30
	Zonas comunes	50	40
Cultural	Teatros	30	30
	Cines	30	30
	Salas de exposiciones	45	35
Comercial		50	40

- En un **suceso acústico** causado por las instalaciones individuales o colectivas del edificio, el máximo permitido es 65 dBA durante el día y 55 dBA durante la noche en los recintos protegidos.

Soluciones:

- Pantallas acústicas
- Asfalto absorbente
- Desviar el tráfico
- Mejorar el aislamiento y T (acondicionamiento).

Cuestiones de autoevaluación, tema 10

- Explique porqué el nivel acústico en el recinto receptor depende del tiempo de reverberación del recinto emisor, para una misma fuente.
- Explique porqué una fuente de potencia acústica fija puede originar un NPS menor en un recinto anejo si se reduce el tiempo de reverberación en el recinto donde se halla la fuente, p. e. simplemente aumentando A_{in}.
- Explique porqué según sea el espectro del sonido incidente, el aislamiento global puede ser diferente.
- Observe que con particiones disjuntas en paralelo se obtiene una especie de promedio de aislamiento y con particiones en serie se obtiene una acumulación o suma de aislamientos.
- Si se decuplica (10 veces) la masa superficial de una pared simple, de acuerdo a la ley de la masa, ¿es posible obtener unos 10 dB de aumento de TL?.

Actividades propuestas, tema 10

- Por medio de buscadores en Internet localice elementos constructivos de separación tipo mamparo o tabique e identifique su pérdida por transmisión o TL como función de la frecuencia, denominada a manudo como coeficiente R.
- Como parte de la actividad anterior distinga elementos ligeros con capas múltiples de elementos pesados, como un tabique de obra. Un punto de partida para esta clasificación puede ser la norma NBE-DB-HR.
- Una de las partes clásicamente débiles de las fachadas son las ventanas. Investigue el efecto beneficioso de cristales dobles y triples.
- Para construcciones industriales se dispone de puertas especiales, capaces de pérdidas de transmisión elevadas. Investigue la disponibilidad en catálogos en Internet. Compruebe que se logran aislamientos importantes a base de marcos y hojas de acero u otro material pesado, cierre hermético y rellenos absorbentes.