

CAPITULO 5:

Introducción a la acústica
arquitectónica

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

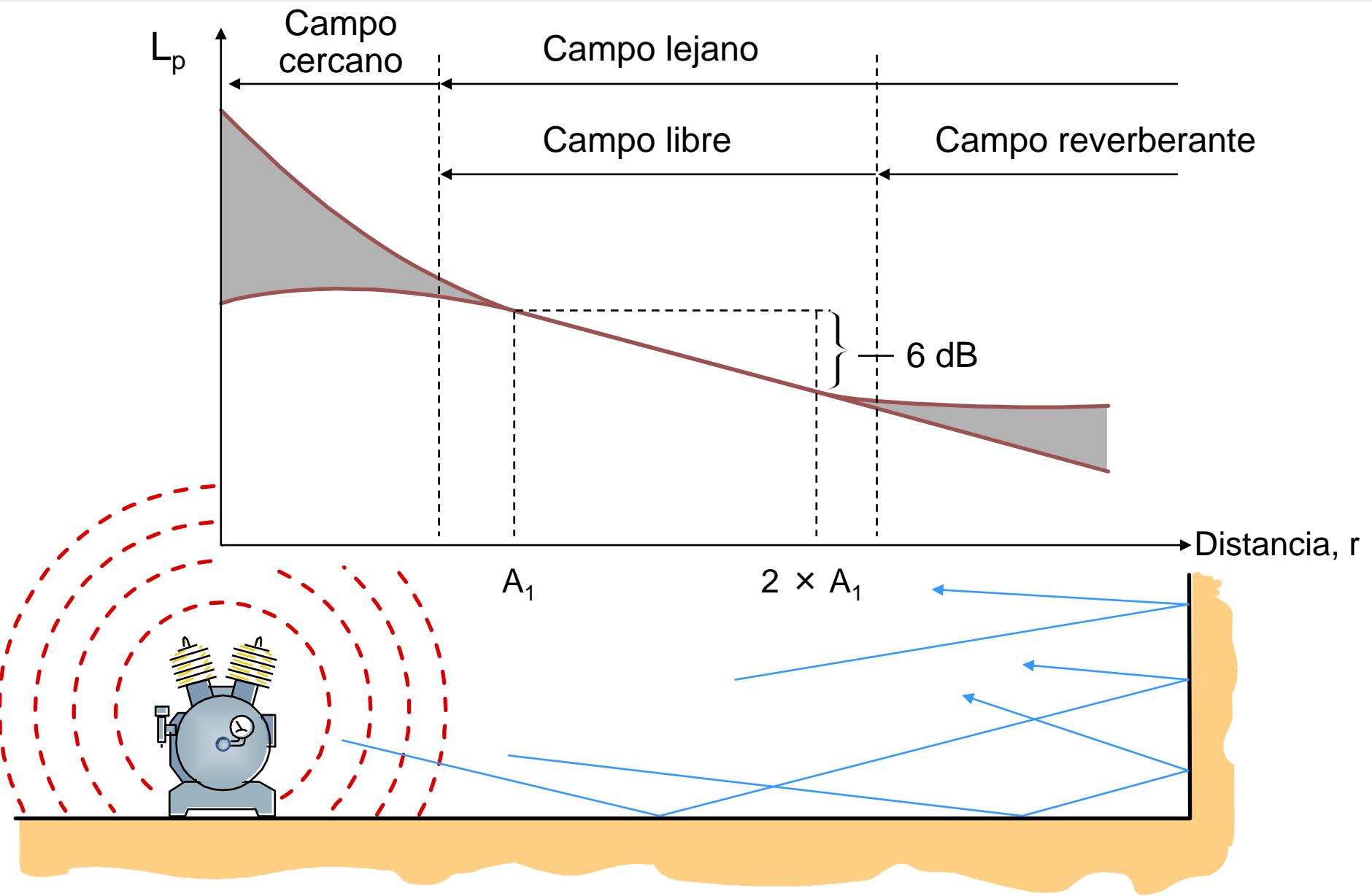
1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

■ Conceptos generales

- Los campos sonoros (ISO 12001)
 - Campo libre: propagación libre en el espacio (no hay obstáculos)
 - Campo cercano: campo en donde la impedancia es compleja (campo sonoro no decrece 6 dB por duplicación de la distancia)
 - Campo lejano: campo en donde se puede considerar solo la parte real de la impedancia (campo sonoro decrece 6 dB por duplicación de la distancia por una fuente omnidireccional)
 - Campo directo: parte del campo que no está alterado por reflexiones
 - Campo reverberante: zona con predominancia del sonido reflejado. Aparición de un equilibrio entre sonido directo y sonido reflejado ⇒ nivel de presión sonora tiende a mantenerse constante.

Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

1. Conceptos generales



1. Conceptos generales

- Aparición de una distancia crítica d_c cuando el nivel de presión del campo directo es igual al nivel de presión del campo reverberado

$$d_c = 0,14\sqrt{QR}$$

con Q factor de directividad de la fuente y R constante de la sala definido por

$$R = \frac{\bar{\alpha}S_T}{1 - \bar{\alpha}} \quad \text{con} \quad \bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_T}$$

$\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio de la sala

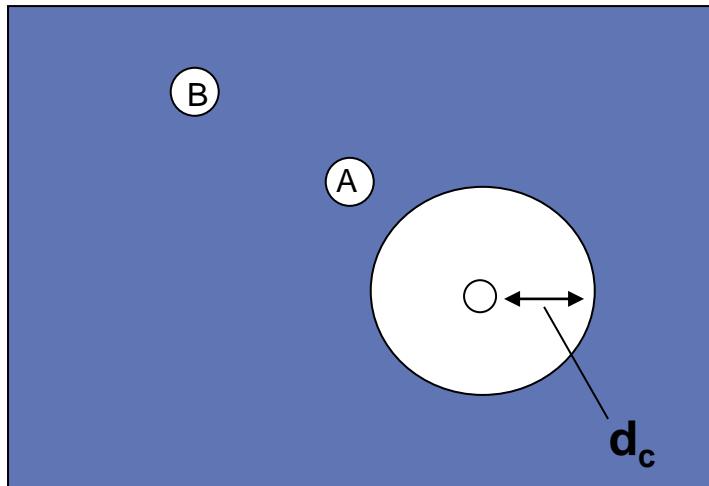
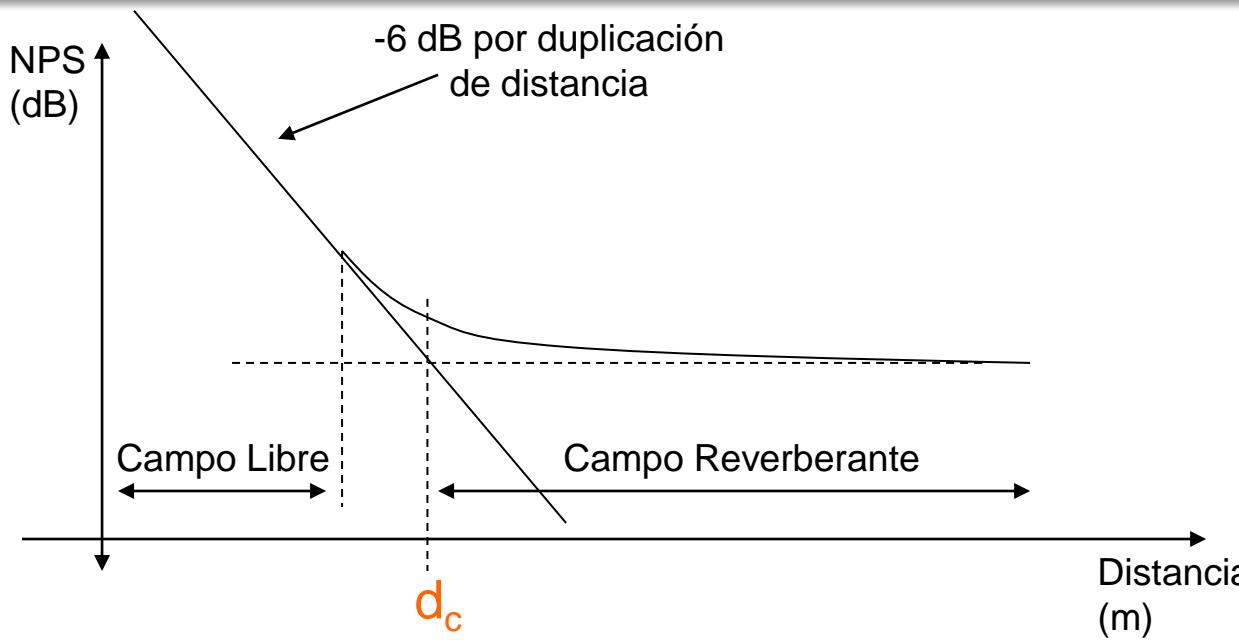
α_i es el coeficiente de absorción de cada superficie S_i

$S_T = \sum_i S_i$ es la superficie total de la sala

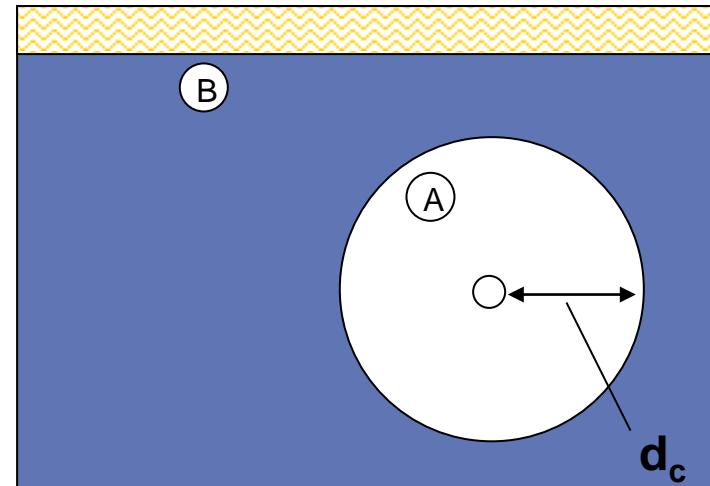
- A la distancia crítica se puede asociar la inteligibilidad

Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

1. Conceptos generales

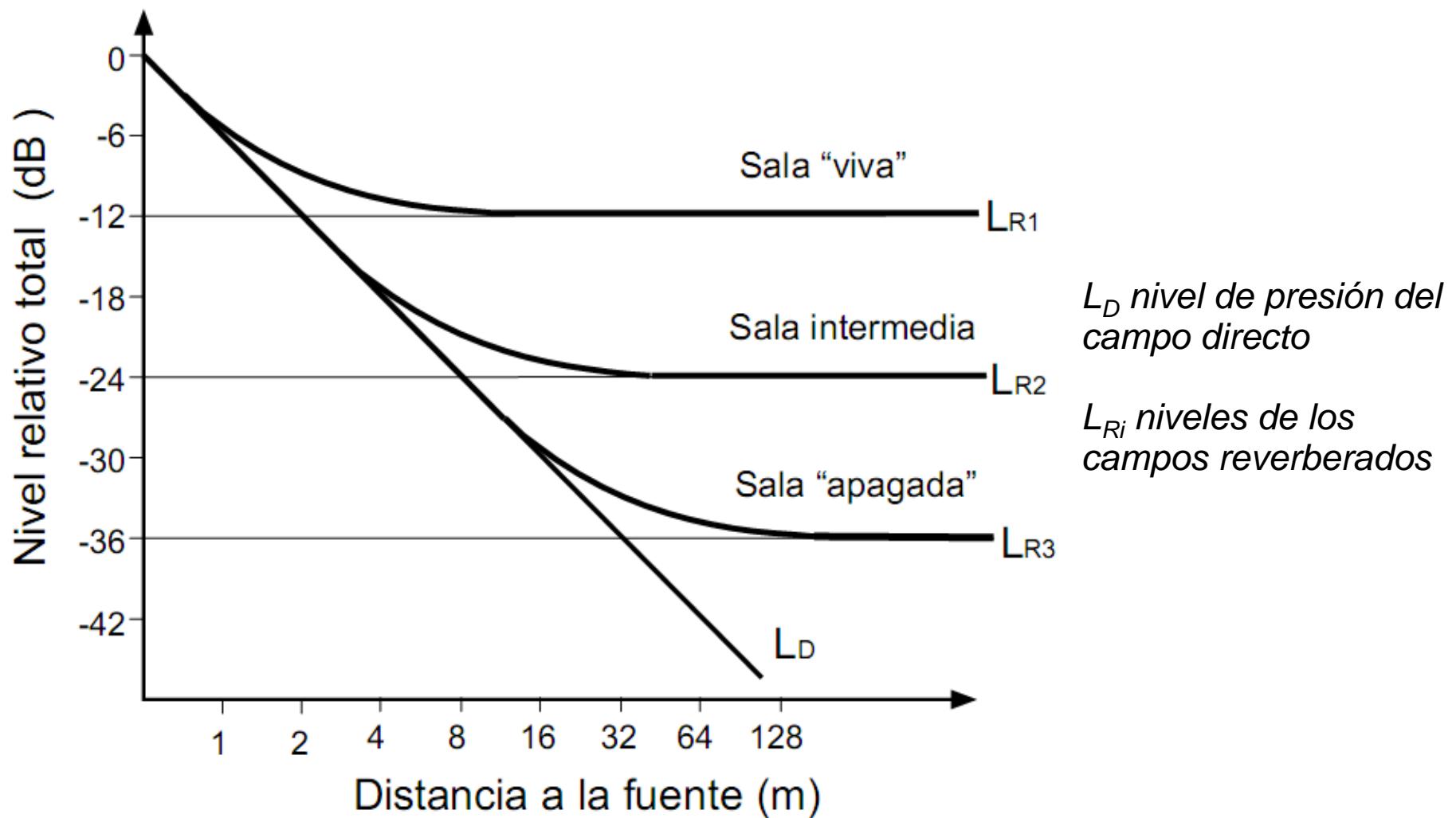


Caso 1. Sala sin absorción
A y B están fuera de d_c
poca inteligibilidad



Caso 2. Sala con un poco de
absorción $\Rightarrow d_c$ mayor
A escucha bien la fuente

- Concepto de sala “viva” (poco absorbente) o “apagada” (muy absorbente)



L_D nivel de presión del campo directo

L_{Ri} niveles de los campos reverberados

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

- **Estudio ondulatorio de los recintos**
 - **Modos acústicos de una sala paralelepípedica**
 - Modos = respuestas naturales, propias de un sistema.
 - Se aplica la ecuación de onda en 3D en coordenadas cartesianas. Para una onda de presión armónica:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0$$

- Se supone que la propagación en cada una de las direcciones es independiente:

$$p = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \cdot e^{j\omega t}$$

- Lo que permite escribir la ecuación en la forma:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 = 0$$

- k es el número de onda angular definido por $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$
- Llegamos a 3 ecuaciones independientes en X, Y y Z

$$\begin{cases} X(x) = C_x \cos(k_x x + \varphi_x) \\ Y(y) = C_y \cos(k_y y + \varphi_y) \\ Z(z) = C_z \cos(k_z z + \varphi_z) \end{cases}$$

- Las superficies de la sala son consideradas como rígidas

$$\Rightarrow \quad \varphi_i = 0 \quad y \quad k_i = \frac{\pi}{L_i} n_i$$

con los L_i las dimensiones de la sala y $n_i = 0, 1, 2, 3, \dots$

- La presión acústica total se escribe como la sumatoria de los modos acústicos

$$p(x, y, z, t) = \sum_{n_x, n_y, n_z} P \cos\left(n_x \frac{\pi}{L_x} x\right) \cos\left(n_y \frac{\pi}{L_y} y\right) \cos\left(n_z \frac{\pi}{L_z} z\right) e^{j\omega_n t}$$

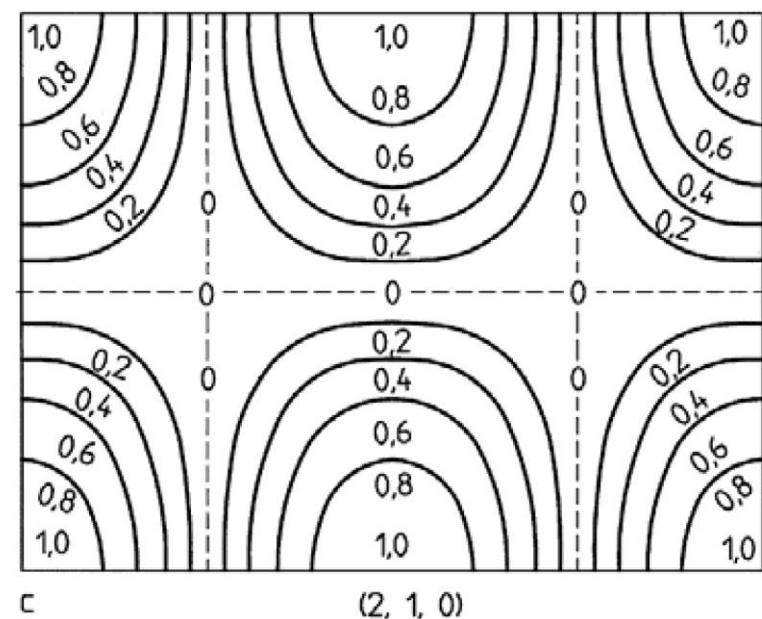
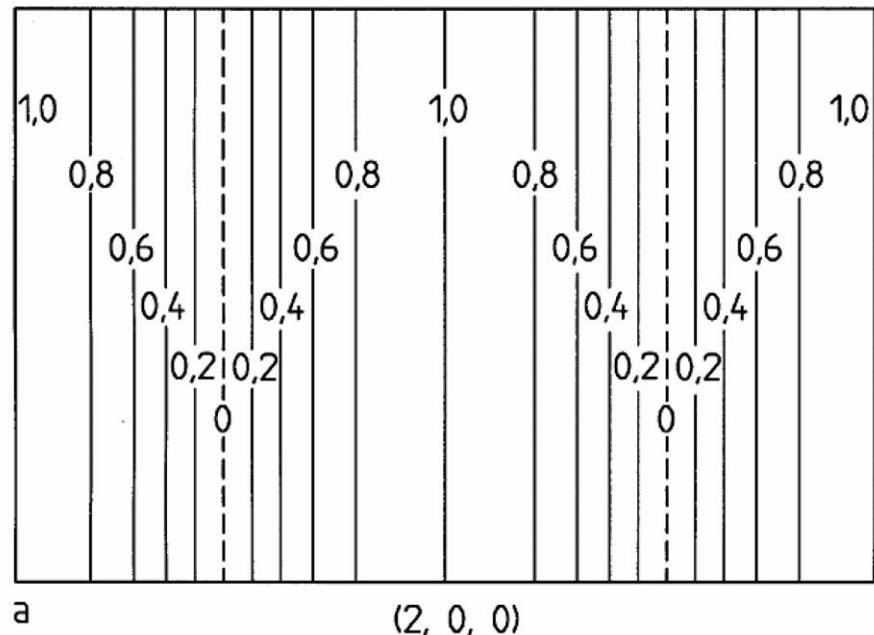
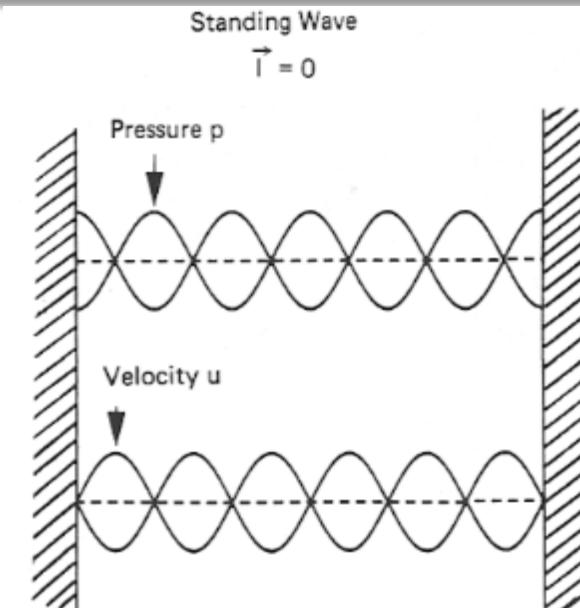
L_x, L_y, L_z = dimensiones de la sala

n_x, n_y, n_z = números enteros. 0, 1, 2, 3...

- ⇒ La posición de los vientres y de los nodos de presión no varían en el tiempo: se establecen *ondas estacionarias*!
- Estas posiciones definen los modos acústicos de la sala definidos por las frecuencias naturales

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

- Los modos se dividen en 3 grupos
 - Los modos **axiales** cuando sólo 1 de n_x, n_y, n_z es >
 - Los modos **tangenciales** cuando 2 de n_x, n_y, n_z son > 0
 - Los modos **oblicuos** cuando los 3 n_x, n_y, n_z son > 0
- Ejemplos de modos acústicos en 2D



- Ondas estacionarias

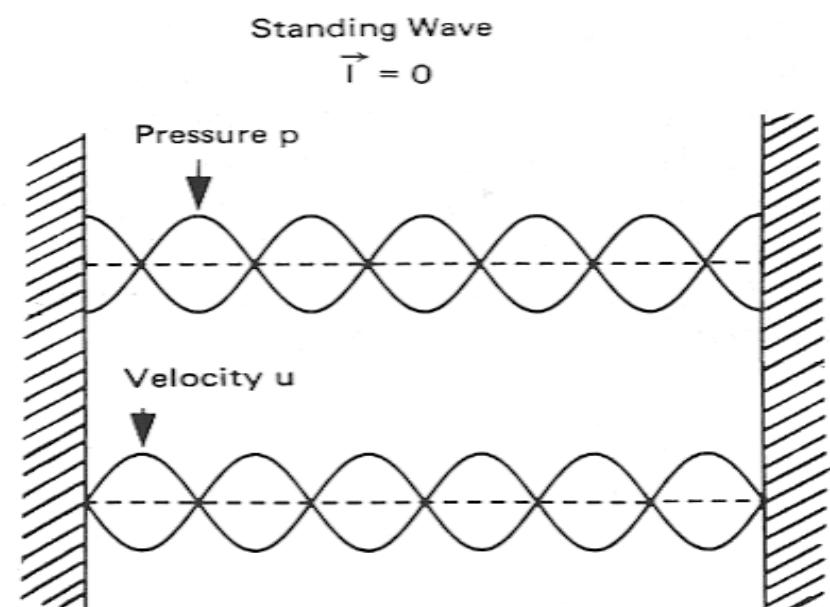
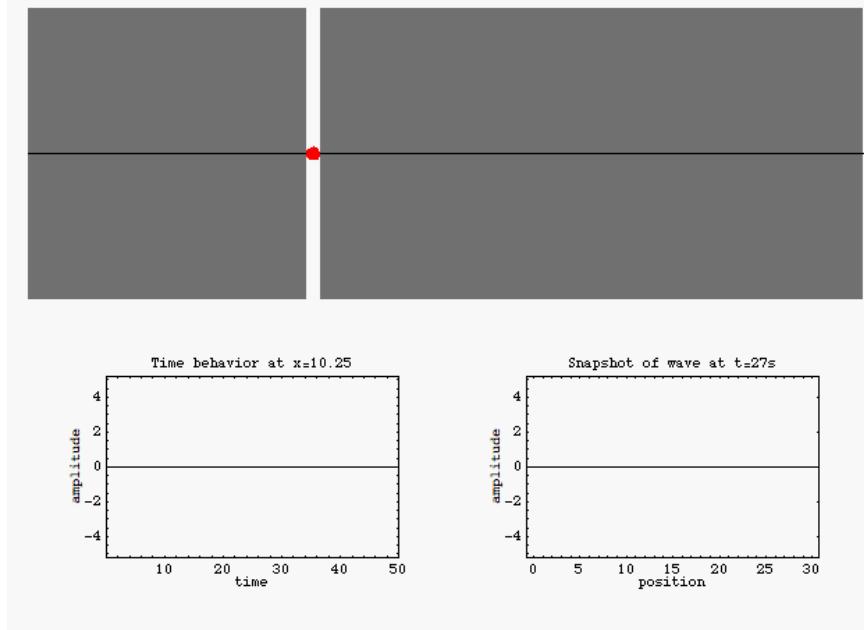
Una onda sinusoidal propagándose en el espacio libre no tiene las posiciones de los máximos y mínimos de presión fija en el espacio

Cuando una onda se refleja sobre un obstáculo la sumatoria entre la onda incidente y la onda reflejada se traduce por la aparición de **onda estacionarias**:

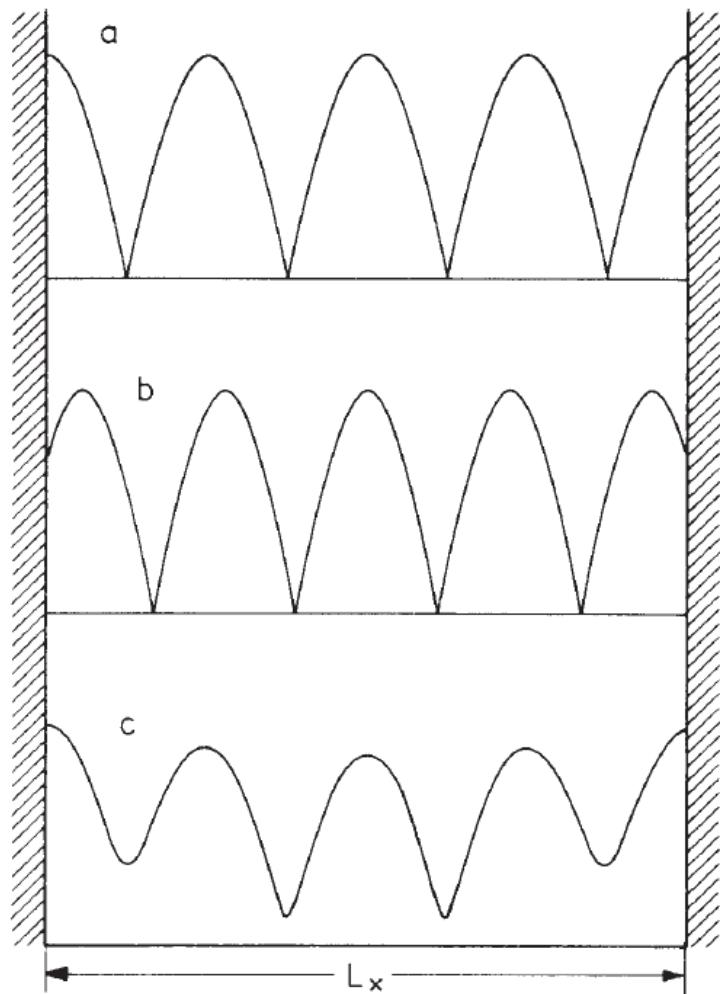
La posición de los máximos de presión y de los mínimos de presión se fija en el espacio!

<http://www.walter-fendt.de/ph14e/stwaveref.htm>

<http://www.falstad.com/ripple/>

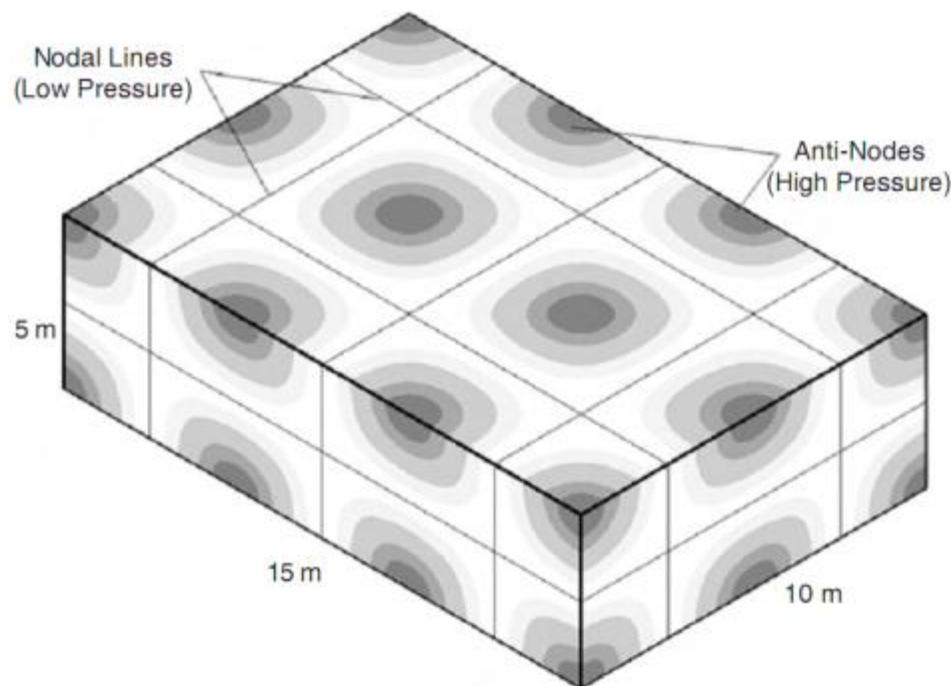


- Ilustración de onda estacionarias



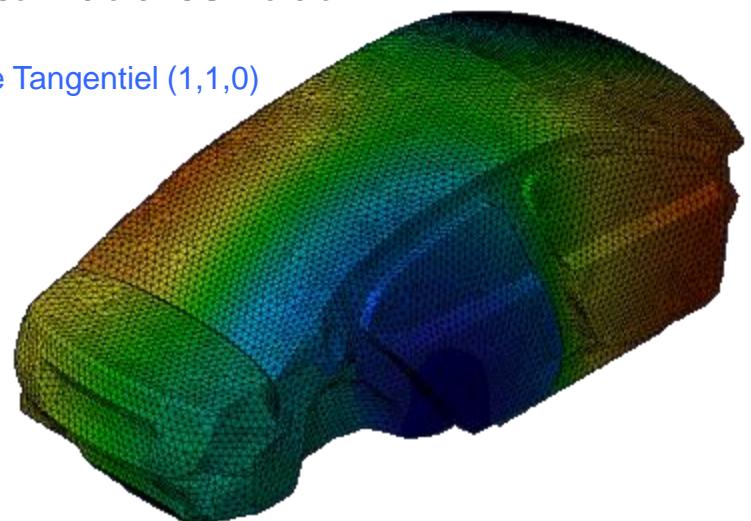
- a) Caso onda entre dos superficies paralelas y totalmente rígidas = sin absorción (reflexión total)
 - b) Impedancia compleja pura (caso de un resonador)
 - c) Impedancia de un material absorbente
- En un caso general los mínimos nunca serán nulos.

- Ejemplo de modo acústico en 3D:
modo (2,3,1)

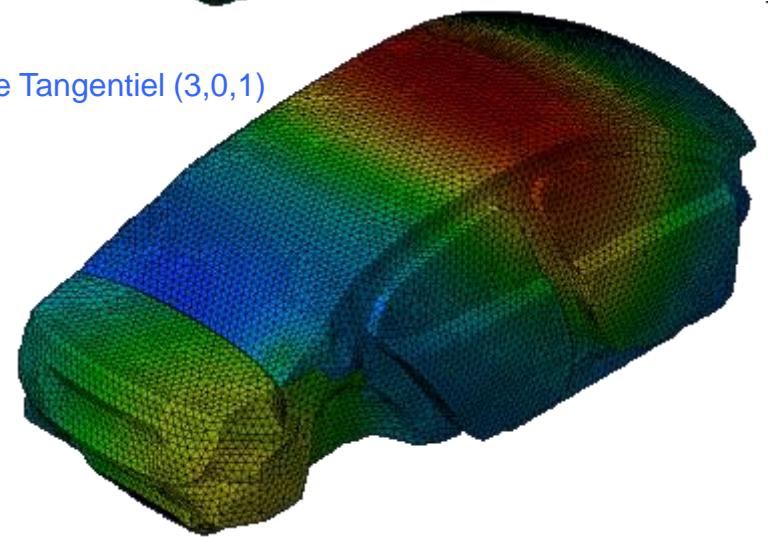


- Ondas estacionarias en una cavidad cerrada

Mode Tangential (1,1,0)



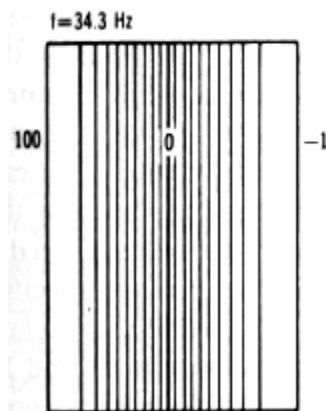
Mode Tangential (3,0,1)



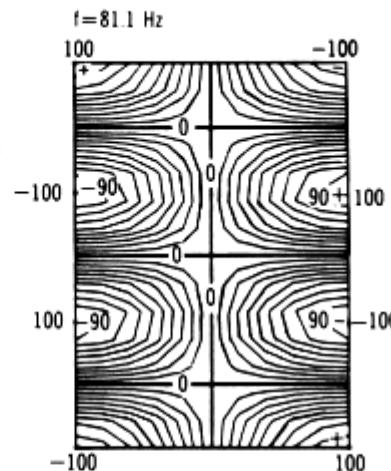
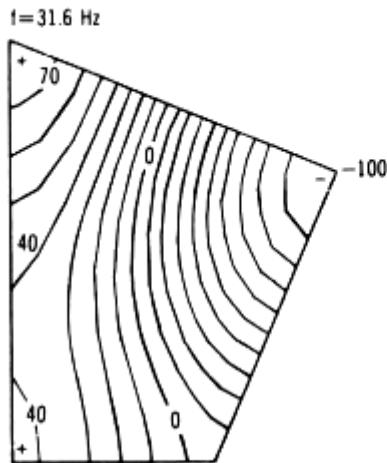
<http://www.falstad.com/circosc/>

<http://www.falstad.com/modebox/>

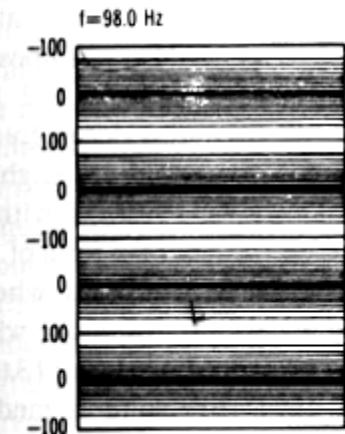
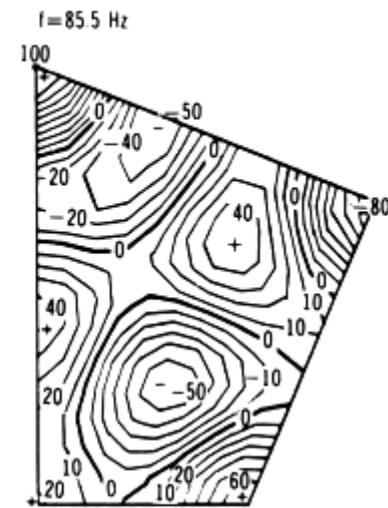
- Distribución de los modos en función de la forma



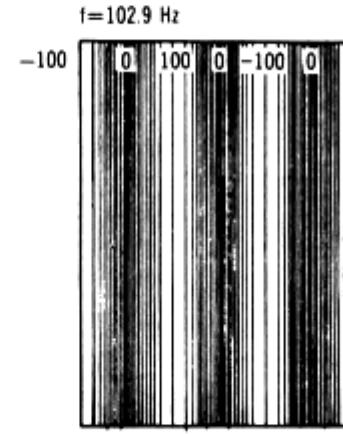
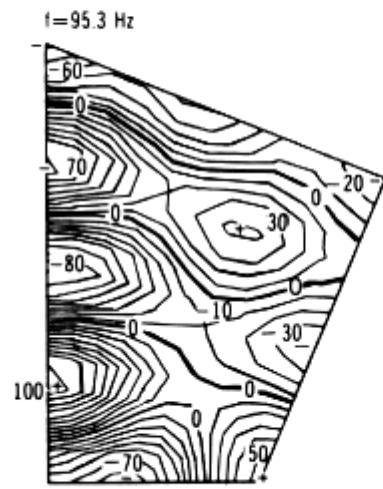
(A) The 1,0,0 mode of the rectangular room (34.3 Hz) compared to the nonrectangular room (31.6 Hz).



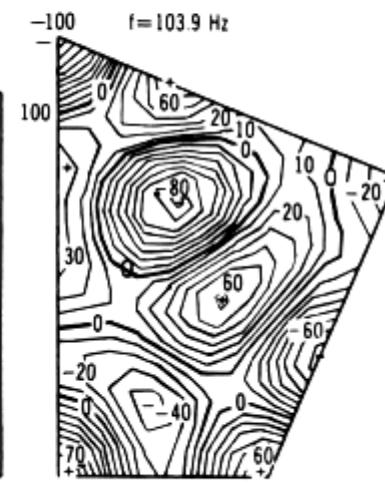
(B) The 3,1,0 mode of the rectangular room (81.1 Hz) compared to the nonrectangular room (85.5 Hz).



(C) The 4,0,0 mode in the rectangular room (98 Hz) compared to the nonrectangular room (95.3 Hz).



(D) The 0,3,0 mode (102.9 Hz) contrasted to the nonrectangular room (103.9 Hz).

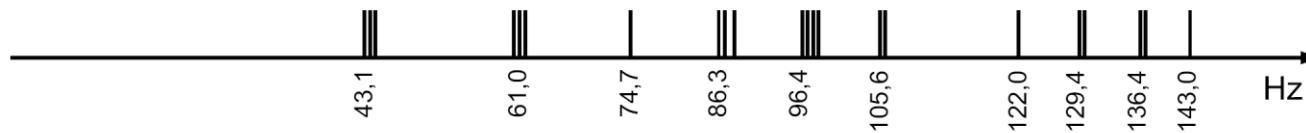


- Ejemplo de la dispersión de los modos en dos salas

a) Sala de : $L_x = 6,25 \text{ m}$, $L_y = 3,75 \text{ m}$, $L_z = 2,5 \text{ m}$



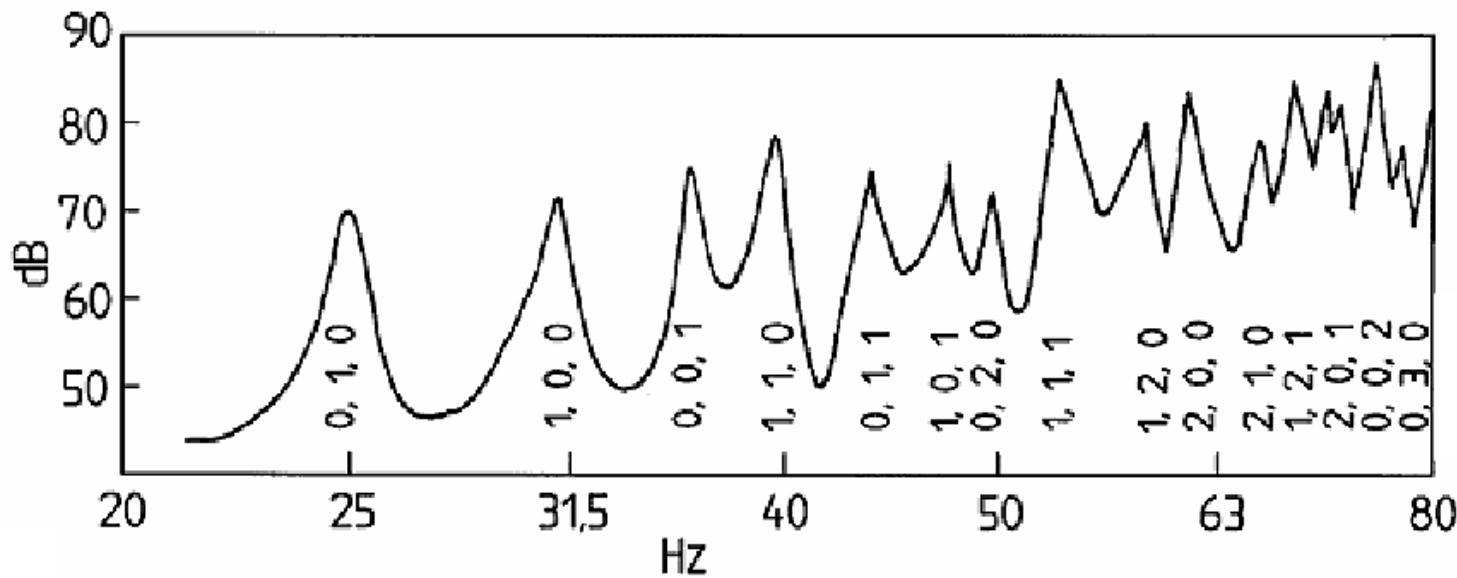
b) Sala de : $L_x = 4 \text{ m}$, $L_y = 4 \text{ m}$, $L_z = 4 \text{ m}$



Caso a) sala con proporciones óptimas, la repartición de los modos es parcialmente uniforme

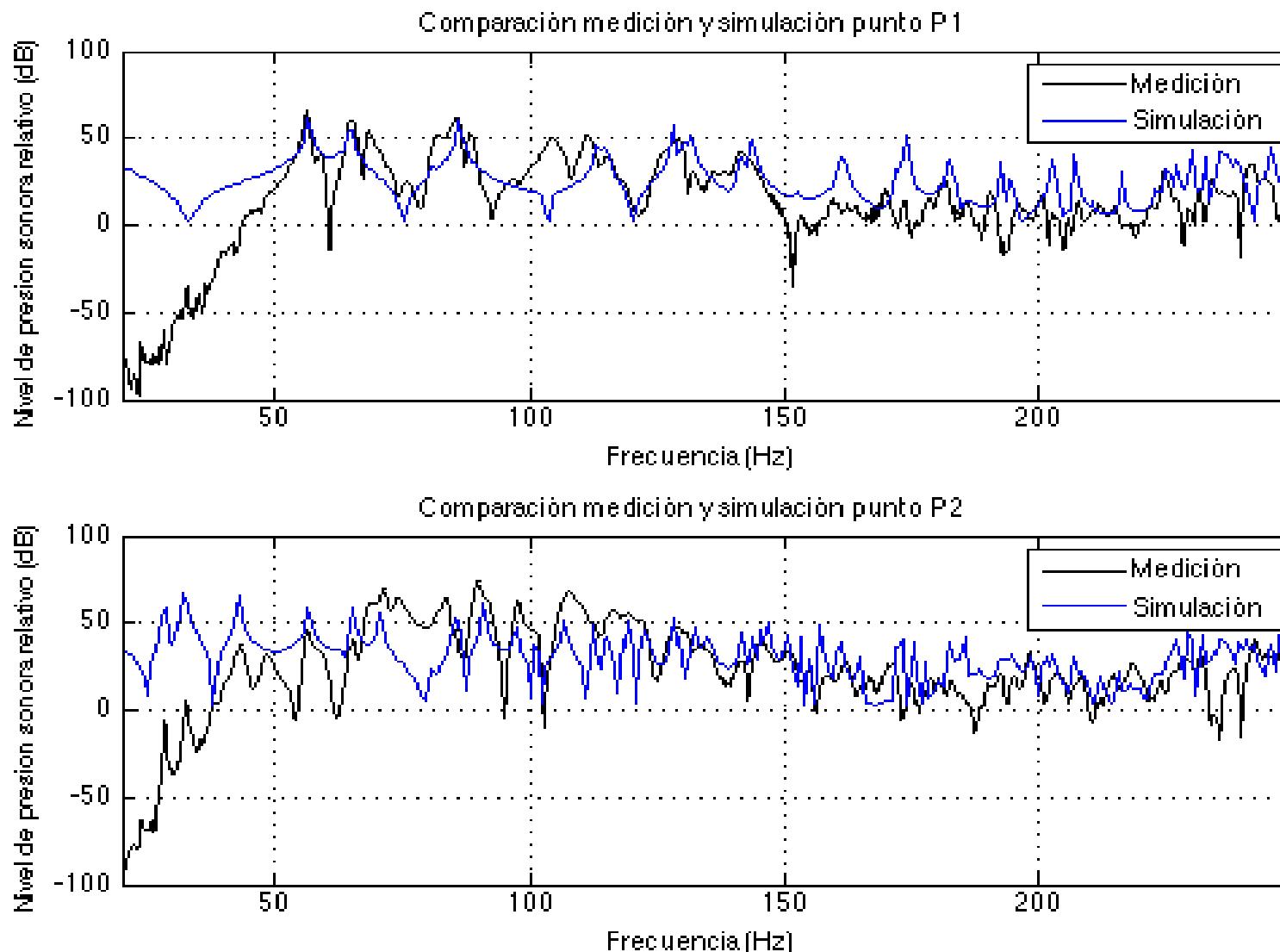
Caso b) sala de forma cúbica, concentración de modos
⇒ fenómeno de **coloración del sonido**

- Función de transferencia de una sala:
 - respuesta en frecuencia entre una fuente en un punto MF y un receptor en un punto MR



- La densidad de modos crece con la frecuencia. Por esto en medios y altos siempre tenemos muchos modos por tercio de octava, pero en bajas frecuencias, por existir pocos modos, su distribución uniforme no está garantizada. En ese caso el oído percibe claramente la caída en la densidad de modos en un tercio de octava.

- Función de transferencia de una sala:

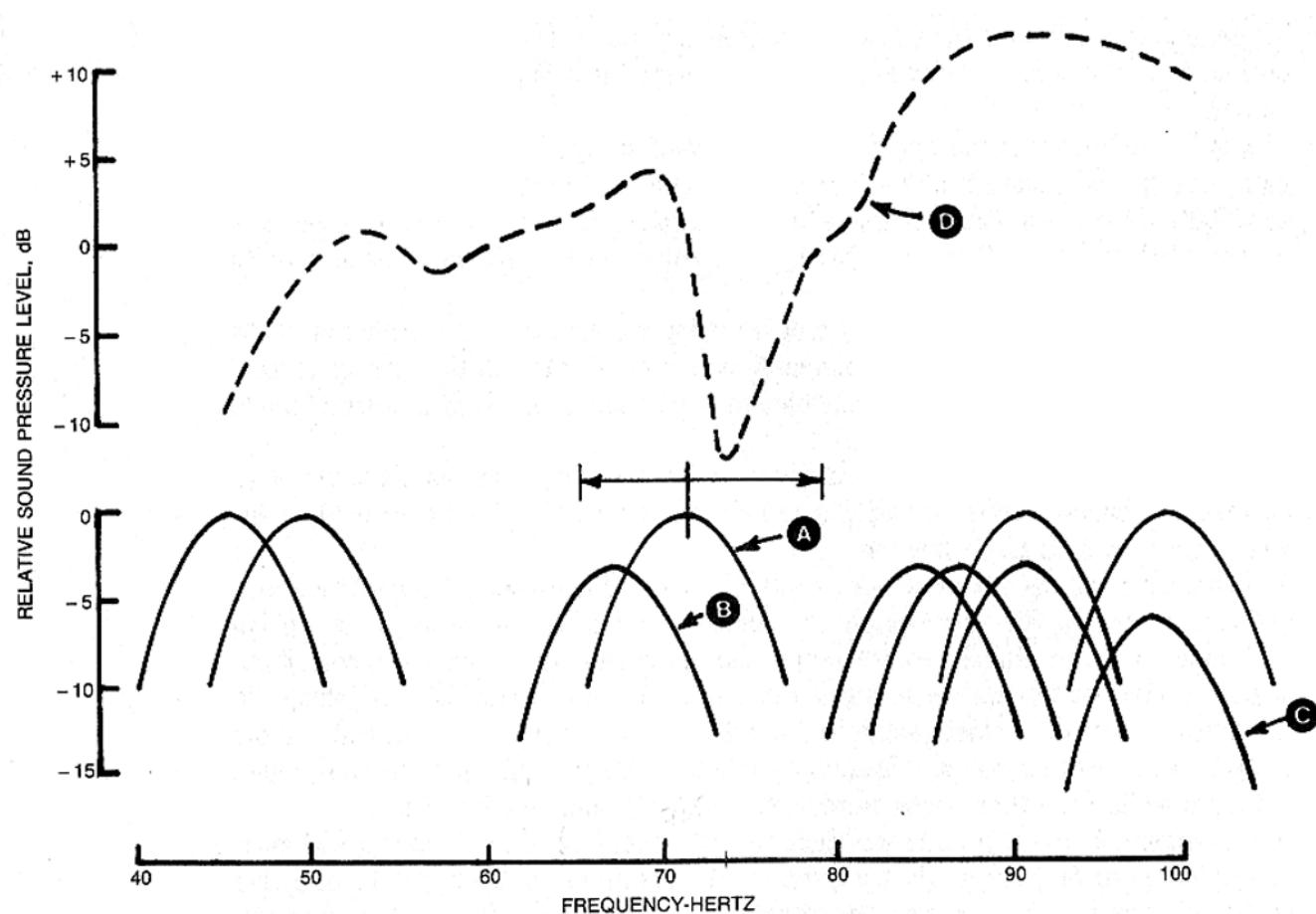


- Energía relativa entre modos:

Axiales: 0 dB

Tangenciales: -3 dB

Oblícuos: aprox. -6 dB



Attempted correlation of calculated modes and the measured swept-sine response of the test room over the frequency range 40 Hz to 100 Hz. (A) Axial modes. (B) Tangential modes. (C) Oblique mode. (D) Reproduction of the 40- to 100-Hz portion of room response

■ La densidad modal

- Cuanto más altas están las frecuencias, mayor es el número de modos.
- Se puede estimar el número de modos inferiores a una frecuencia f por:

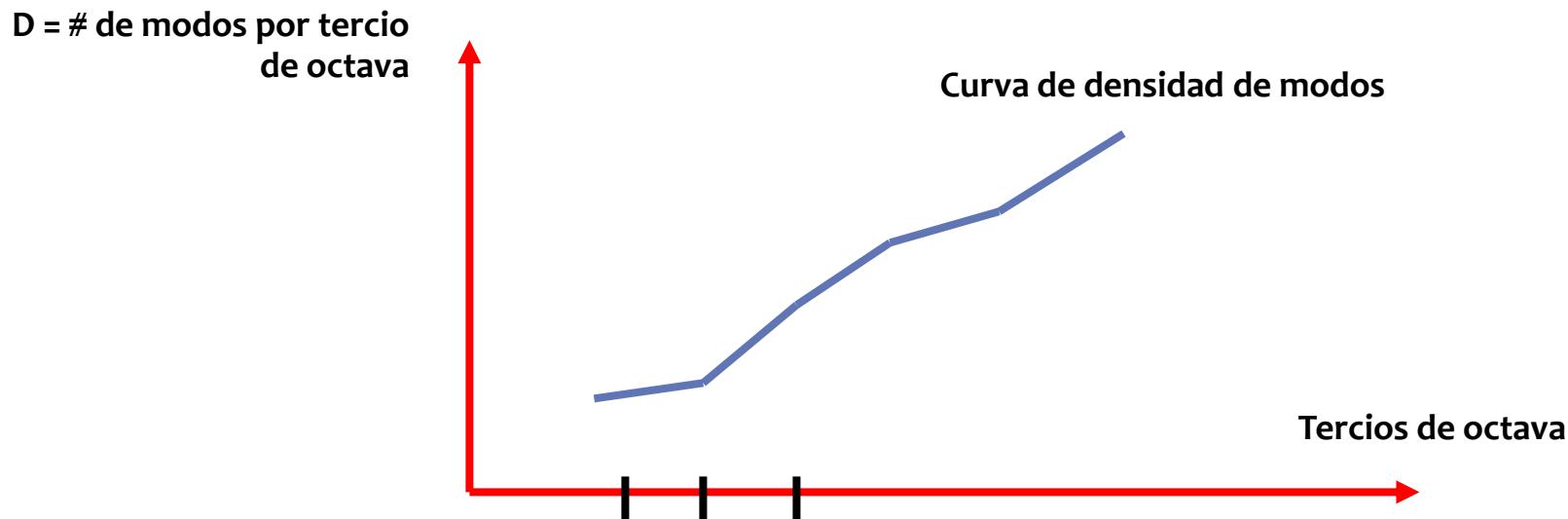
$$N = \frac{4\pi V}{3} \left(\frac{f}{c} \right)^3 + \frac{\pi S}{4} \left(\frac{f}{c} \right)^2 + \frac{L f}{8 c}$$

- Con V volumen de la sala, S la superficie total y L longitud total de las aristas
- Ejemplo: $f = 300$ Hz y $L_x \times L_y \times L_z = 10 \times 15 \times 4$ m

$$N = 2045 \text{ modos}$$

- Criterios de densidad modal
 - Criterio de Schröeder:
 - Fija en 10 el número de modos propios dentro de un ancho de banda igual a la mitad del valor de la frecuencia central.
 - Criterio de Piske:
 - Es más optimista y fija esta cifra en 5 modos propios y bien distribuidos dentro de la banda considerada.
 - Criterio Morse y Ingard:
 - Recomiendan 10 modos propios como mínimo para cada 10Hz de ancho de banda.

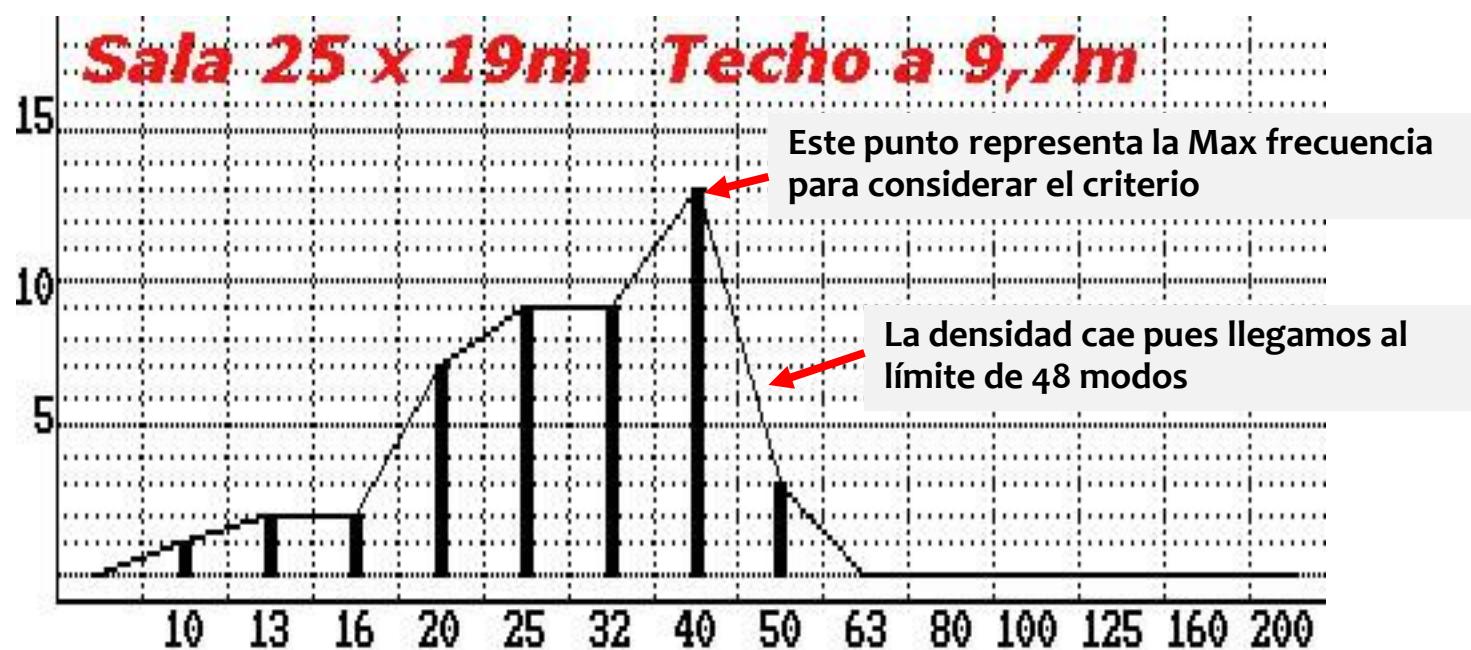
- Criterios de densidad modal
 - Criterio de Bonello:
 - El criterio se basa en calcular los 48 primeros modos de resonancia de un recinto de paredes paralelas
 - Para evaluar si estamos ante una distribución irregular de los primeros modos, debemos aplicar el criterio de la densidad de modos. Para ello calculamos los 48 primeros modos y representamos su densidad dividiendo el espectro en tercios de octava normalizados, indicando cuántos modos existen en cada tercio. Se traza una curva:



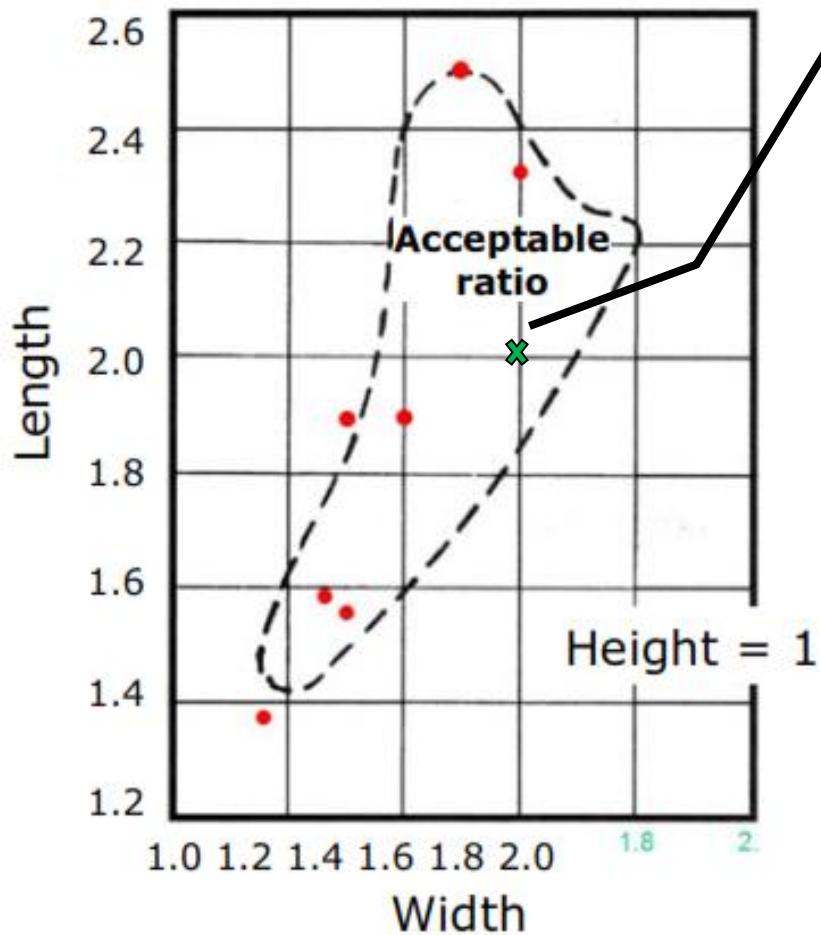
- 1) La curva debe crecer monótonamente o a la sumo dos modos consecutivos pueden tener la misma densidad
- 2) No se permiten modos dobles en tercios con $N < 5$

Ejemplo:

recinto de dimensiones correctas



- Criterio de Bolt



Los puntos rojos fueron las salas estudiadas por Bolt para analizar las proporciones de salas con buena distribución de modos

Recomendación de proporciones adecuadas:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}(W-1) &< L-1 < 3(W-1) \\ 2 &< W+L < 4 \end{aligned}$$

- Comparación de los nuevos modelos que fijan las proporciones entre Ancho (W), Largo (L) y Alto (H) de una sala.

Richard H. Bolt recommendations Note on the normal frequency statistics in rectangular rooms. J.Acoust.Soc.Am. 18(1) 130-133, 1946

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}(W-1) &< L-1 < 3(W-1) \\ 2 &< W+L < 4 \end{aligned}$$

EBU / ITU recommendations European Broadcasting Union, TR R22, 1998 International Telecommunication Union ITU-R BS.1116-1, 1998

$$\begin{aligned} 1.1W/H &\leq L/H \leq (4,5W/H) - 4 \\ W &< 3H, L < 3H, \\ &5\% \text{ protective rule} \end{aligned}$$

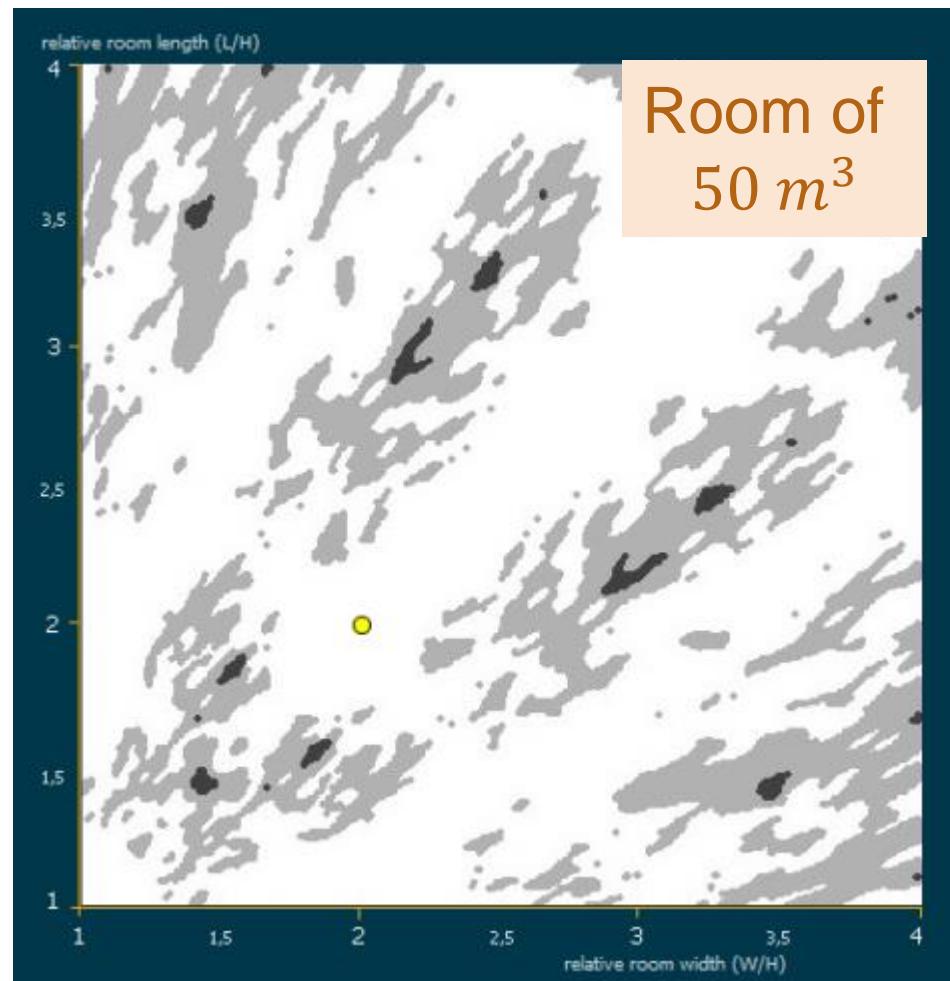
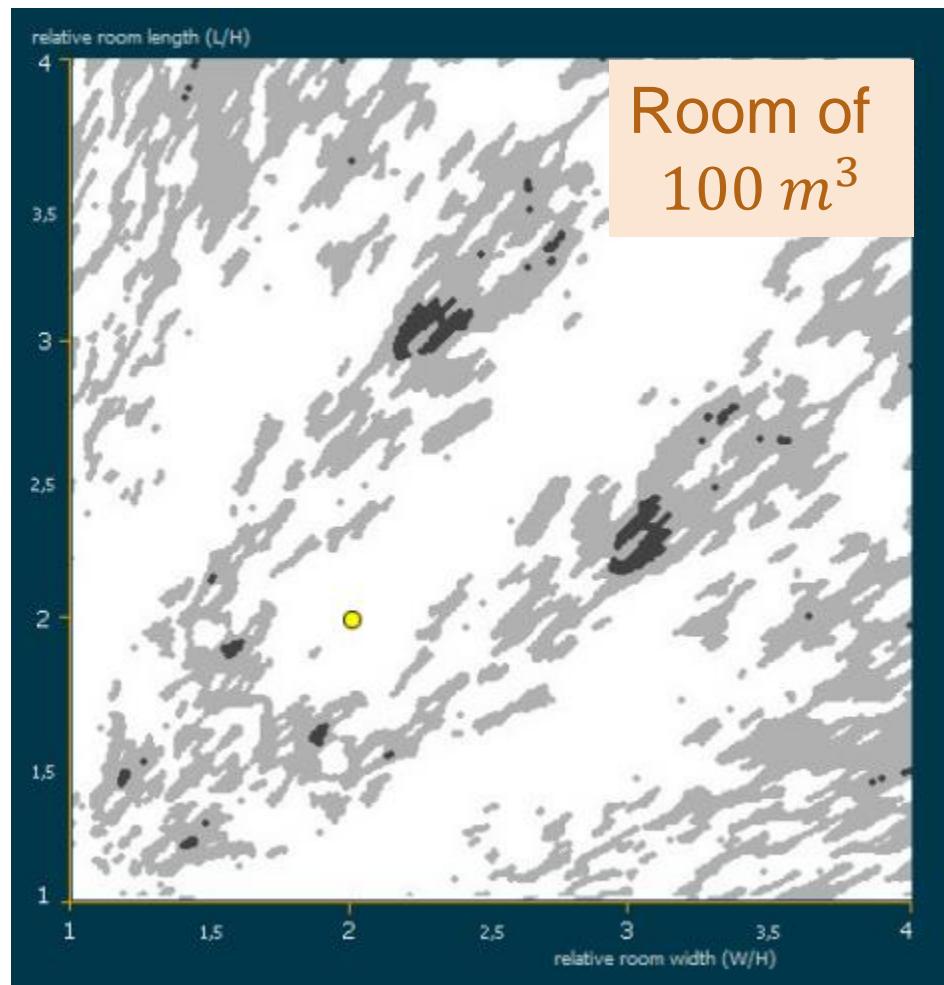
IEC recommendations IEC TR 60268-13 Sound System Equipment- Part 13 Listening tests on loudspeakers, 1998

$$\begin{aligned} W/H &\leq L/H \leq (4,5W/H-4) \\ W/H &< 3, L/H < 3 \end{aligned}$$

Trevor Cox recommendations Room Sizing and Optimization at Low Frequencies Audio Eng. Soc., Vol. 52, No. 6, 2004

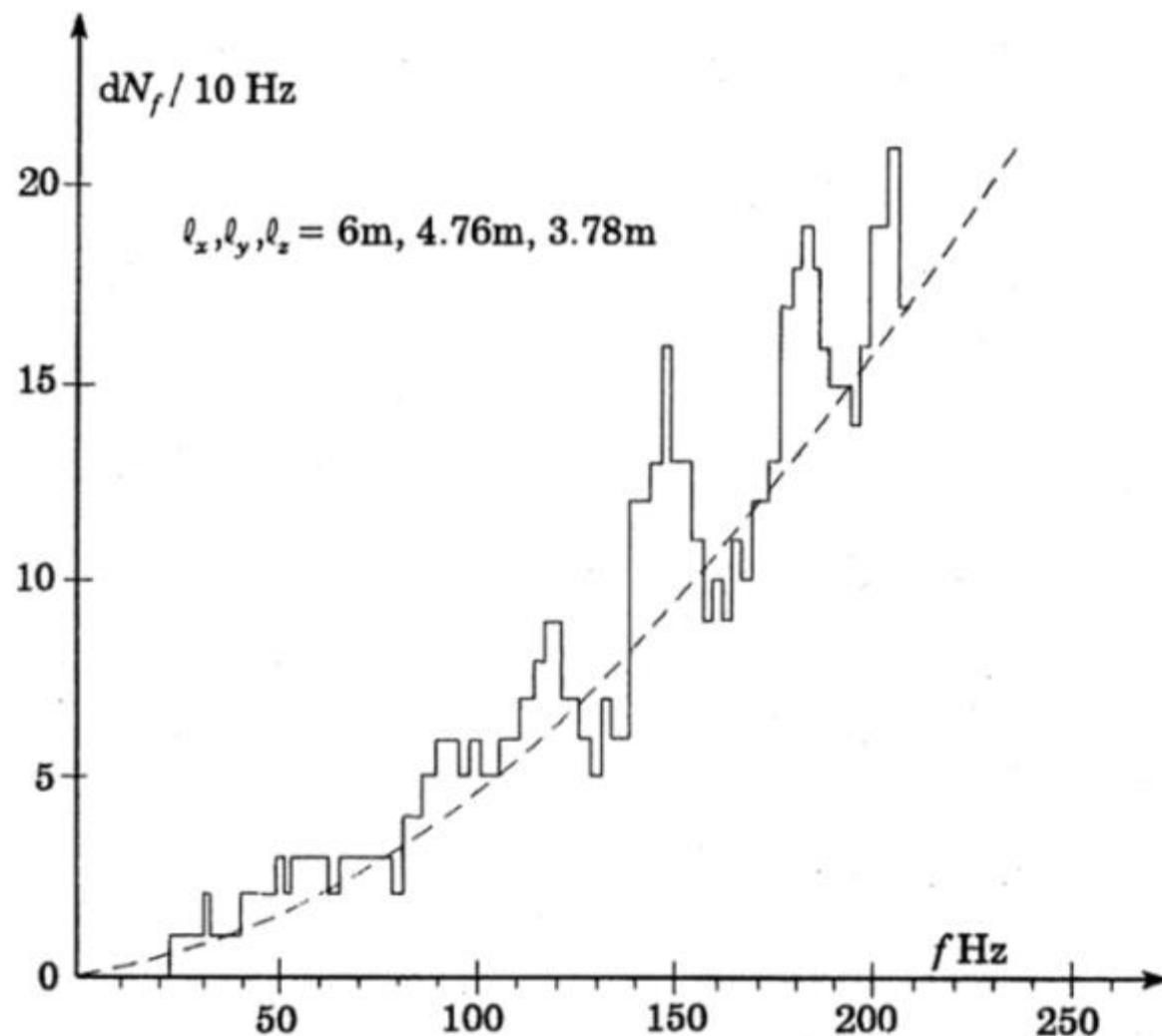
$$\begin{aligned} 1.1W/H &\leq L/H \leq (1,32W/H) + 0,44 \\ W &< 3H, L < 3H, \\ &5\% \text{ protective rule} \end{aligned}$$

- Ilustración del criterio de Trevor Cox (2004):



www.acoustic.ua/forms/rr.en.html

- En la práctica se utiliza la densidad modal definida por intervalo de frecuencia.



- La descripción modal se torna muy complicada y difícil de modelizar a medida que aumentan las frecuencias
 - A frecuencias altas, superposición de los vientres y nodos de presión --> nivel de presión casi igual en todo el espacio (campo tiende a ser difuso)
 - Límite de utilización del modelo definido por la frecuencia de Schroeder
- $$f_r = 2000 \sqrt{\frac{T_R}{V}}$$
- con TR el tiempo de reverberación del recinto y V su volumen
- ⇒ Se necesita utilizar otro modelo, un modelo estadístico

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
- 3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación**
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

- Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
 - El modelo de Wallace C. Sabine
 - Fin siglo XIX, aparición formula de Sabine revolucionó el mundo de la acústica arquitectónica
 - En 1900, realizó su primer auditórium basado en esta formulación: el *New Boston Music Hall*
 - El modelo tiene en cuenta la absorción de las paredes



Wallace C. Sabine

- El nivel sonoro en una sala suficientemente reverberante es la suma
 - Del campo directo, corresponde a la irradiación de la fuente
 - Del campo reverberado, corresponde a las reflexiones múltiples
- El **campo directo** se deduce de las leyes de propagación de las ondas emitidas por una fuente

$$I_D = \frac{p_{Def}^2}{\rho_0 c} = \frac{WQ}{4\pi d^2}$$

con W la potencia de la fuente y
Q su factor de directividad

p_D siendo la presión sonora del campo directo

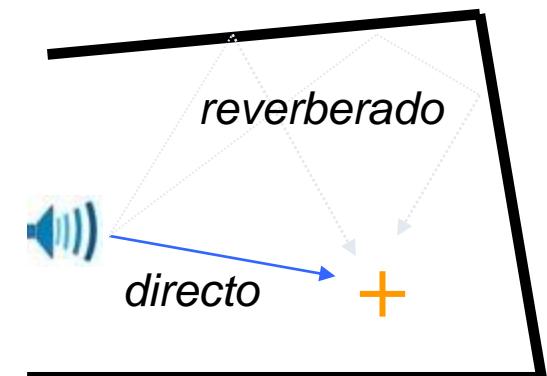
- El **campo reverberado** está asociado a la parte del sonido que fue reflectado muchas veces por las diferentes superficies de la sala

- El balanceo de energía total de la sala es igual a

$$dE = dE_s - dE_A$$

dE_s corresponde a la energía aportada por la fuente al campo reverberado

dE_A corresponde a la energía absorbida por las paredes



- Después de una reflexión la parte dE_s que no es absorbida es

$$dE_s = (1 - \bar{\alpha})Wdt$$

- La intensidad incidente en campo difuso es igual a $I_{inc} = \frac{p_{S_{ef}}^2}{4\rho_0 c}$
Con p_S la presión sonora del campo reflejado
- Y la parte dE_A que es absorbida es $dE_A = \bar{\alpha}W_{inc}dt = \bar{\alpha}S_T \frac{p_{S_{ef}}^2}{4\rho_0 c} dt$
- Entonces

$$\frac{dE}{dt} = (1 - \bar{\alpha})W - \bar{\alpha}S_T \frac{p_{S_{ef}}^2}{4\rho_0 c}$$

- Cuando el equilibrio esta establecido (después excitación)

$$\frac{dE}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{p_{Sef}^2}{\rho_0 c} = \frac{4W}{R}$$

con R la constante de la sala

- El **campo total** es igual a: $\frac{p_{ef}^2}{\rho_0 c} = \frac{p_{Def}^2}{\rho_0 c} + \frac{p_{Sef}^2}{\rho_0 c}$

$$\frac{p_{ef}^2}{\rho_0 c} = W \left(\frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Campo directo
decrece 6dB por duplicación de la distancia

Campo reverberado

■ El tiempo de reverberación

- Energía total sala = Energía potencial + Energía cinética
- Se puede mostrar que la *densidad de energía* potencial es igual a $\frac{p_{ef}^2}{2\rho_0 c^2}$
- La superposición de muchos modos permite hacer la hipótesis que en cada punto del volumen las **densidades de energías** (E/V) potenciales y cinéticas son iguales:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{V}{\rho_0 c^2} \frac{d(p_{ef}^2)}{dt}$$

- Cuando una fuente se apaga rápidamente la energía aportada por la fuente al campo reverberado se considera nula

$$\frac{dE}{dt} = \frac{V}{\rho_0 c^2} \frac{d(p_{Sef}^2)}{dt} = -\frac{p_{Sef}^2}{4\rho_0 c} \bar{\alpha} S_T$$

- Las soluciones de la ecuación diferencial se escriben en la forma

$$p_s^2(t) = p_{s(t=0)}^2 \exp\left(\frac{-c\bar{\alpha}S_T}{4V}t\right)$$

$p_s^2(t = 0)$ es la presión eficaz cuando se apaga la fuente

- Por definición el tiempo de reverberación TR (o RT o T_{60}) es el tiempo necesario para que la energía decrece de 60 dB o sea 10^{-6} Pa.

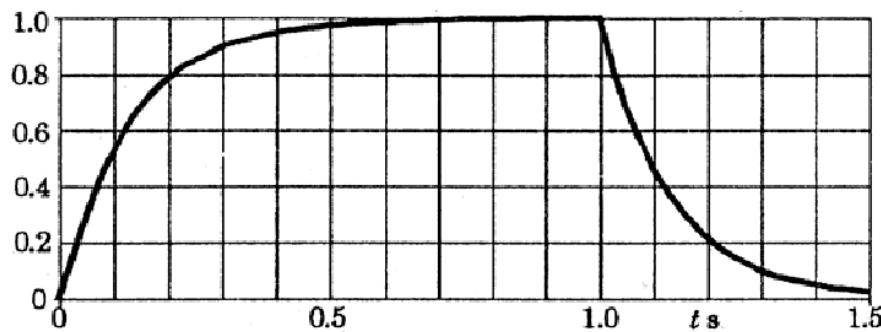
$$10^{-6} = \exp\left(\frac{-c\bar{\alpha}S_T}{4V}t\right)$$

$$T_R = \frac{24}{c \log(\exp)} \frac{V}{\bar{\alpha}S_T} = \frac{0,161 V}{A}$$

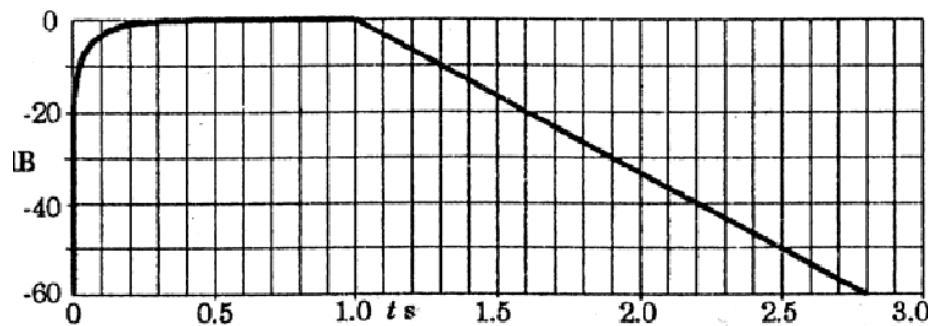
Formula de Sabine

Con $A = \bar{\alpha}S_T$ la absorción total o absorción sabine (en m^2)

- Condiciones de validad de la formula:
 - Que la repartición de la absorción sea homogénea (para que el coeficiente de absorción promedio tenga un sentido)
 - Que la sala sea suficientemente regular para poder suponer que las densidades de energías son iguales (*campo difuso*)
 - Que la sala no sea muy absorbente



Aspecto de la medición de un TR,
escala lineal



escala logarítmica

■ El modelo de Norris-Eyring

- Mas adaptado a las salas muy absorbentes
- Basado sobre el principio de la acústica geométrica:
 - Cada vez que una onda encuentra una pared ella pierde un poco de su energía de $(1 - \bar{\alpha})$
 - Después de n reflexiones $p_s^2(t) = p_{S(t=0)}^2 (1 - \bar{\alpha})^n = p_{S(t=0)}^2 e^{n \ln(1 - \bar{\alpha})}$
 - En un tiempo t la distancia recorrida es $c t = \sum_i l_i = n l_m$ con l_i las distancias entre 2 reflexiones sucesivas y l_m el camino libre medio

- Se supone que el medio de propagación es homogéneo: la probabilidad de propagación en cada dirección del espacio es igual (Kosten):

$$l_m = \frac{4 V}{S_T}$$

- Entonces $p_S^2(t) = p_{S(t=0)}^2 e^{\frac{cS_T}{4V} \ln(1-\bar{\alpha})t}$

Por definición del tiempo de reverberación se puede calcular que

$$T_R = \frac{0,161 V}{-\ln(1 - \bar{\alpha}) S_T}$$

Formula de Norris-Eyring

- Condiciones de validez de la fórmula:
 - Que la repartición de la absorción sea suficientemente homogénea
 - Que la sala sea suficientemente regular
 - Que la difusión en la sala sea homogénea

Problema: validez de las fórmulas!!

- Corrección para las salas que no tienen una absorción homogénea:

$$T_R = \frac{0,161 V}{-\sum_i S_i \ln(1-\alpha_i)}$$

Formula de Millington
(rayos series)

$$T_R = \frac{0,161 V}{-S_T \ln\left[1 - \frac{1}{S_T} \sum_i S_i \alpha_i\right]}$$

Formula de Eyring-Eyring
(rayos paralelos)

- Corrección para las salas que no tienen una absorción homogénea con grandes superficies S_j hechas de pequeñas superficies S_i :

$$T_R = \frac{0,161 V}{-\sum_j S_j \ln\left[1 - \frac{1}{S_T} \sum_i S_i \alpha_i\right]}$$

Formula de Eyring-Millington
(rayos series/paralelos)

- Corrección para las salas rectangulares con absorción muy diferente entre las diferentes superficies:

$$T_R = \sum_{j=x,y,z} \frac{0,161 V}{-\frac{S_T^2}{S_j} \ln(1 - \alpha_j)}$$

Formula de Fitzroy

$$T_R = \left[\frac{0,161 V}{-S_T \ln(1 - \alpha_x)} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0,161 V}{-S_T \ln(1 - \alpha_y)} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0,161 V}{-S_T \ln(1 - \alpha_z)} \right]^{\frac{S_z}{S}}$$

Formula de Arau

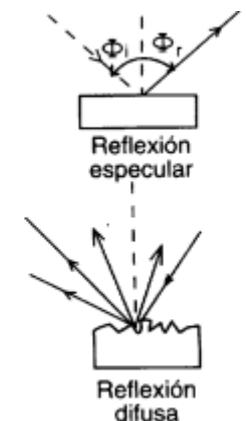
- Con los $S_{x,y,z}$ las superficies totales de las paredes opuestas
- Y los $\alpha_{x,y,z}$ el coeficiente de absorción promedio de las paredes opuestas

- Corrección cuando el medio de propagación no es homogéneo:
Fórmula de **Kuttruff**, basada en un coeficiente de reflexión*.
 - Considera que absorción y reflexión dependen del ángulo de incidencia.
Por esa misma razón se utiliza la ley de Lambert de reflexión difusa.

$$T_R = \frac{0,161 V}{S_T \alpha_{Kutt}}$$

con $\alpha_{Kutt} = \ln \frac{1}{\bar{\rho}} + \ln \left(1 + \frac{\sum_n \rho_n (\rho_n - \bar{\rho}) S_n^2}{(\bar{\rho} S)^2 - \sum \rho_n^2 S_n^2} \right)$

y: $\bar{\rho} = 1 - \bar{\alpha}$; $\rho_n = 1 - \alpha_n$ siendo n una área de superficie S_n

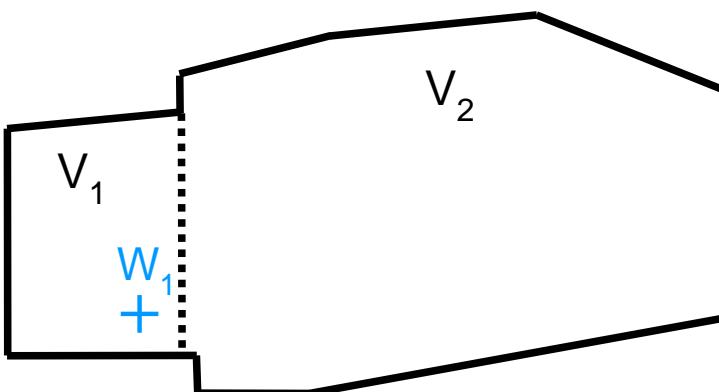


* Esta formula fue expresada según la formulación de Sabine pero también puede escribirse en base a la formulación de Eyring

- Corrección a la fórmula de Fitzroy considerando que la absorción no es uniforme: Fórmula de **Neubauer**
- Y mucho más...

■ Aplicación: acoplamiento de recintos

- Se consideran dos salas, de volumen V_1 y V_2 , acopladas por una abertura de superficie S_0 (ej. caja escenario/sala)



- Las densidades de energía se escriben:

$$\varepsilon_1 = \frac{A_{22}(4W_1/c)}{A_{11}A_{22} - S_0^2} \quad \varepsilon_2 = \frac{S_0(4W_1/c)}{A_{11}A_{22} - S_0^2}$$

con $A_{11} = A_1 + S_0$ y $A_{22} = A_2 + S_0$

- El factor de acoplamiento entre los recintos 1 y 2 se define por:

$$k_a = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{S_0}{A_{22}}$$

Si $A_2 \gg S_0$ la abertura tiene el mismo efecto que una ventana abierta
Si $S_0 \gg A_2$ se puede considerar las dos salas como un solo ambiente

- Si la abertura está cerrada por un material (tipo telón, puerta,...) de coeficiente de transmisión τ , el coeficiente de debilitamiento **R** de esta pared puede ser calculado por:

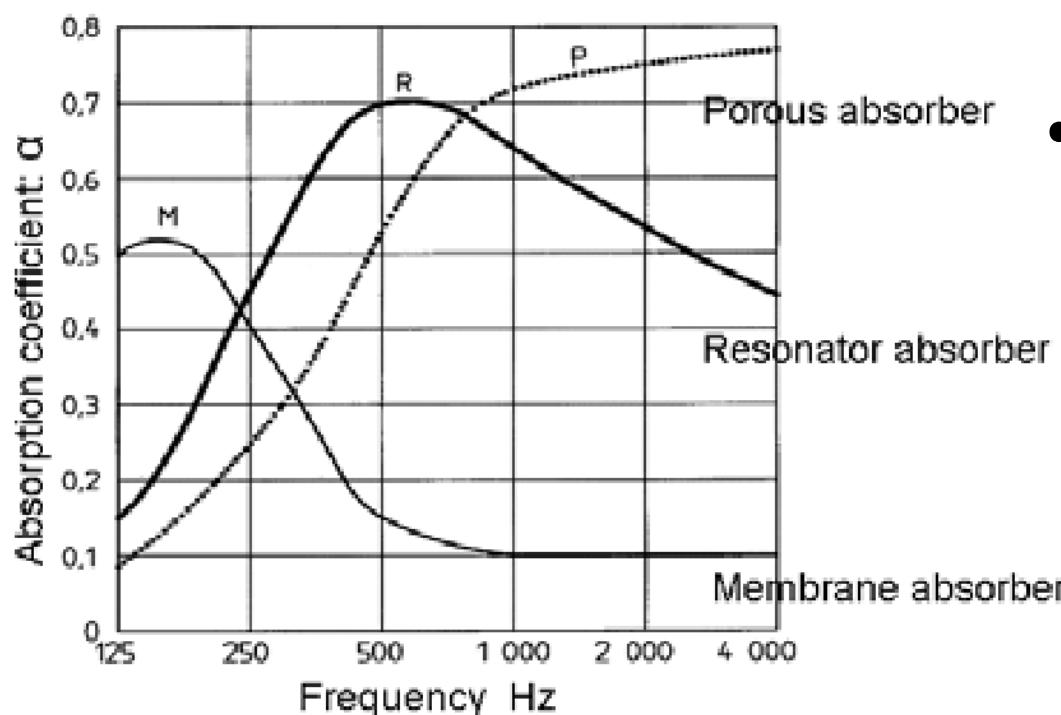
$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S_0}{A_{22}}\right)$$

- con L_1 y L_2 niveles de presión sonora respectivamente en las salas 1 y 2

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
- 4. La absorción acústica**
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

■ La absorción acústica

- Para generar absorción acústica existe dos conceptos:
 - Campo resistivo = consumo de energía
⇒ Caso de los materiales porosos
 - Campo reactivo = almacenamiento de energía
⇒ Caso de los resonadores



- Absorción en rangos de frecuencias diferentes

- Los materiales porosos
 - 3 familias de porosos:
 - Las lanas minerales (de vidrio, de roca)
 - Los fonoabsorbentes (espumas de poliuretano)
 - Los fibrosos textiles (carpetas, telas, cortinas, telones,...)

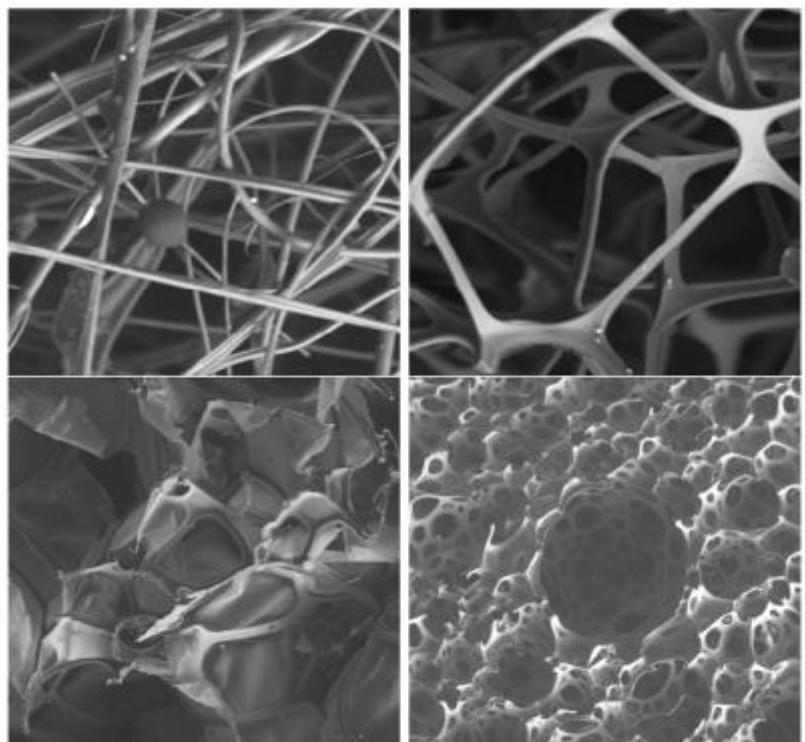


Foto de porosos por microscopio



Lana de vidrio



Lana de roca



Espumas de Poliuretano



- Constitución:
 - Esqueleto (parte sólida) de 1-10% del volumen total
 - Aire = resto del volumen total, los poros están saturados en aire.
 - Se define por porosidad la relación entre el volumen de aire en el material V_{aire} y el volumen total del material V_T :

$$\Phi = \frac{V_{aire}}{V_T}$$

- Proporción del esqueleto pequeña: favorece la penetración de la onda acústica. Este medio sólido esta recorrido por cavidades más o menos tortuosas (los poros) comunicadas con el exterior.

- Al incidir una onda acústica sobre la superficie del material, un importante porcentaje de la misma penetra por los intersticios; haciendo entrar en vibración a las fibras, con lo que se produce una transformación en energía cinética de parte de la energía acústica.
- Por otra parte, el aire que ocupa los poros entra en movimiento, produciéndose unas pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas con el esqueleto, que se transforma en calor.
- Durante la propagación, fenómenos de fricciones (viscosidad) e intercambios de calor en el esqueleto
➔ amortiguación de la onda

4. La absorción acústica

- Micro-geometría muy compleja: modelización basada en parámetros globales al material.

$\rho_{\text{esqueleto}} \gg \rho_{\text{aire}}$ \Rightarrow onda no puede meter el esqueleto en movimiento

- Modelo empírico de **Delany-Bazley**: da una impedancia equivalente al material en función de la resistencia del material al paso del aire σ .
 - El material depende de solo una variable: $X = \frac{\rho_0 f}{\sigma}$
 - Impedancia característica compleja del material dada por

$$Z_e = Z_0 \left(1 + 0,0571 X^{-0,754} - j0,087 X^{-0,732} \right)$$

para $0,01 < X < 1,0$

- El coeficiente de reflexión R (relación entre presión incidente y reflejada a la superficie del material) se deduce de la impedancia de superficie Z_s del material por

$$R = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}$$

donde

con Z_e la impedancia del material, L su espesura y k_e el número de onda del medio definido por

$$Z_s = -j \frac{Z_e}{\Phi} \cotan(k_e L)$$

$$k_e = \frac{\omega}{c} \left(1 + 0,0978 X^{-0,700} - j0,189 X^{-0,595} \right)$$

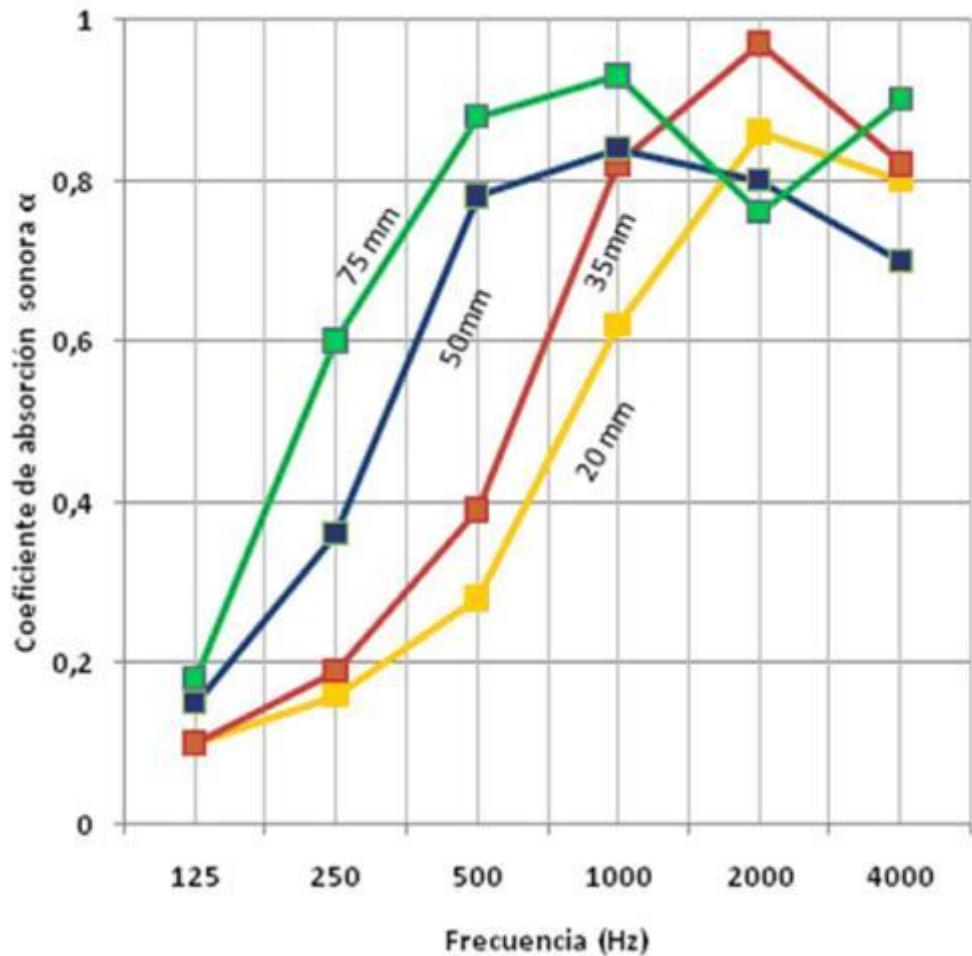
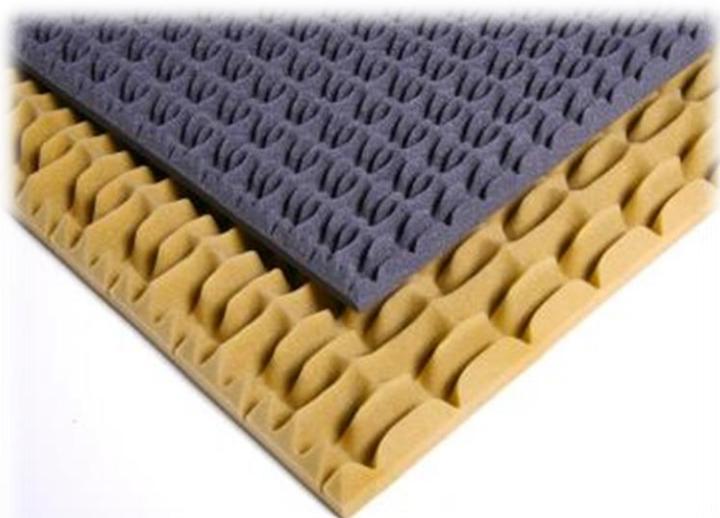
- El coeficiente de absorción se define en incidencia normal por

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

- Existe otro modelo matemático para los materiales porosos, el modelo físico de **Biot**: basado en la porosidad del material Φ , en su resistividad al paso del aire σ y su tortuosidad.
- Es más difícil medir estos parámetros.

- La absorción del material depende de los siguientes parámetros:

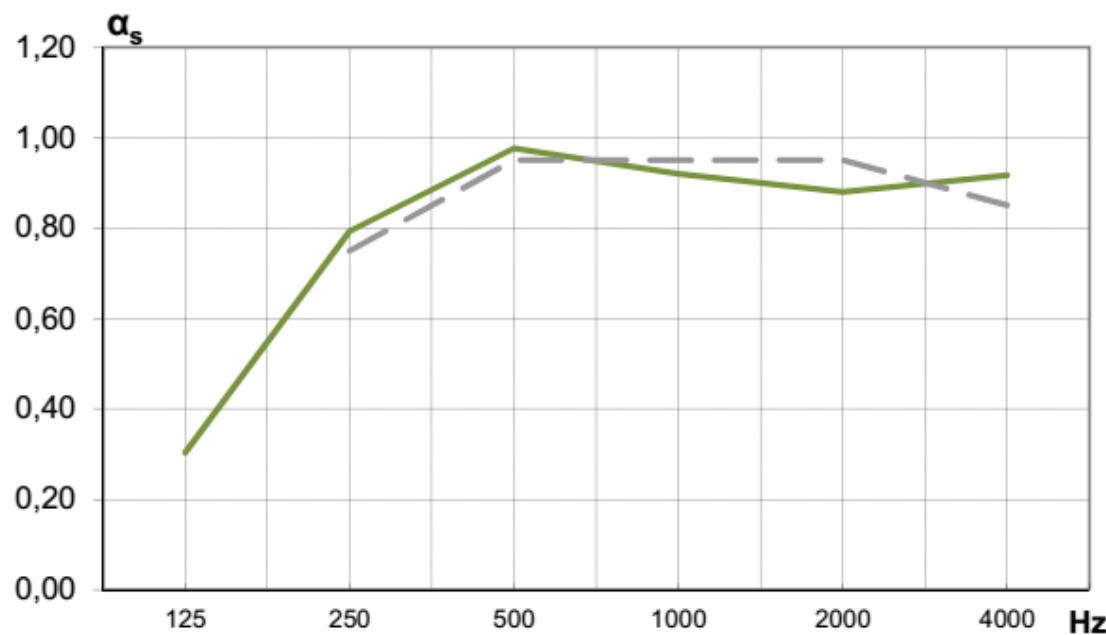
- Espesor de la capa de material
- Frecuencia del sonido
- Porosidad del material
- Montaje



Curva de absorción típica de un material poroso de distintos espesores

- Ejemplos de materiales absorbentes porosos**

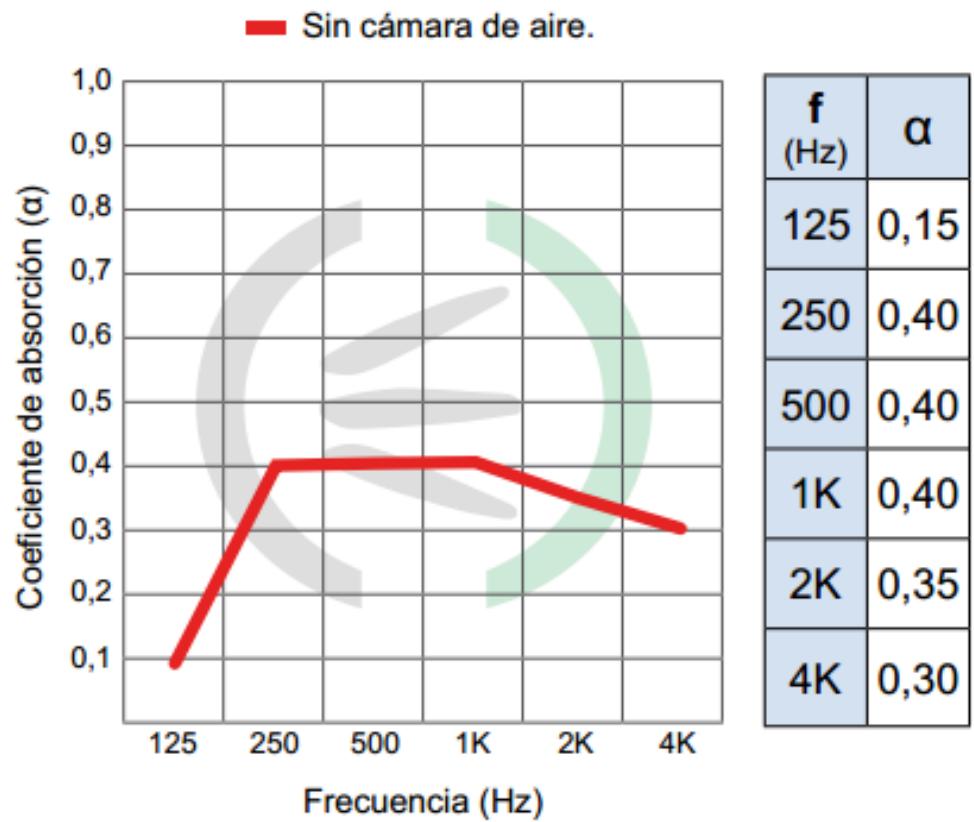
- Lana de roca y lana de vidrio:** Filtro de fibras textiles entrelazadas entre ellas por resinas especiales. Debido a su estructura altamente porosa tiene una gran capacidad de absorción acústica a altas frecuencias



Coeficiente de absorción de un panel de lana de roca de 60 mm de espesor y de 40 kg/m³ de densidad

- Ejemplos de materiales absorbentes porosos**

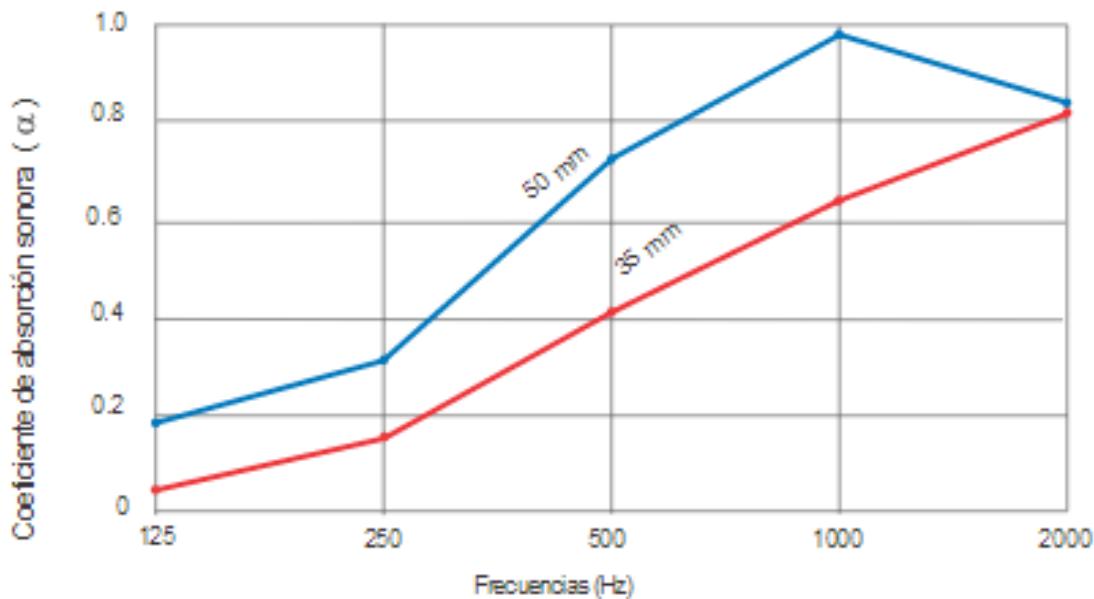
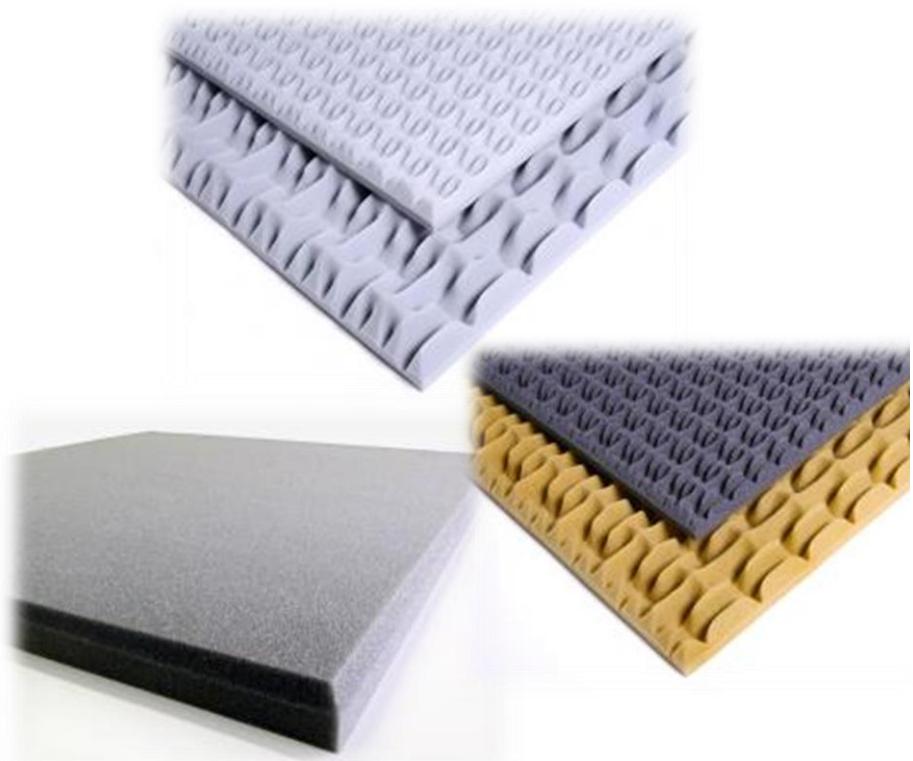
- Acustifiber® F:** Material absorbente compuesto de fibra de poliéster.



Coeficiente de absorción de un panel de 40 mm de espesor y de 15 kg/m^3 de densidad

- Ejemplos de materiales absorbentes porosos**

- Espuma de poliuretano (FOAM):** Material absorbente a base de poliuretano obtenidas por un proceso químico.



Coeficiente de absorción de un panel de Clase 1
(no se prende fuego)

■ Medir materiales porosos

- Porosidad:
 - Agregando agua en el poroso y midiendo la cantidad de agua (método no muy justo)
 - Considerando el aire como un Gas Perfecto y realizando una transformación isotérmica. Se deduce la porosidad entre 2 estados del fluido.
- Resistividad: se deduce de la diferencia de presión entre las dos caras de una muestra de un material poroso.
- Tortuosidad: medición del “tiempo de vuelo” de una impulsión ultrasonora en un material.

- Medir el coeficiente de absorción:

- **Tubo de Kundt (ISO 10534-2, ASTM E1050)**

Permite medir el coeficiente de absorción en incidencia normal

Método valido hasta la frecuencia de corte del tubo (corresponde a la frecuencia de aparición de los primeros modos axisimétricos)

$$f_c = 3,83 \frac{c}{\pi d} \text{ con } d \text{ el diámetro del tubo}$$

- **Método de la cámara reverberante (ISO 354, IRAM 4065)**

Toma en cuenta todas las incidencias

Volumen cámara > 200 m³ y L_{max} < 1.9V^{1/3}

Paredes no paralelas y irregulares para que los modos propios de la sala sean sin picos dobles

Difusión máxima: se agregan reflectores para homogeneizar la presión sonora

- El coeficiente de absorción se deduce de la diferencia de TR entre la presencia o no del material absorbente.

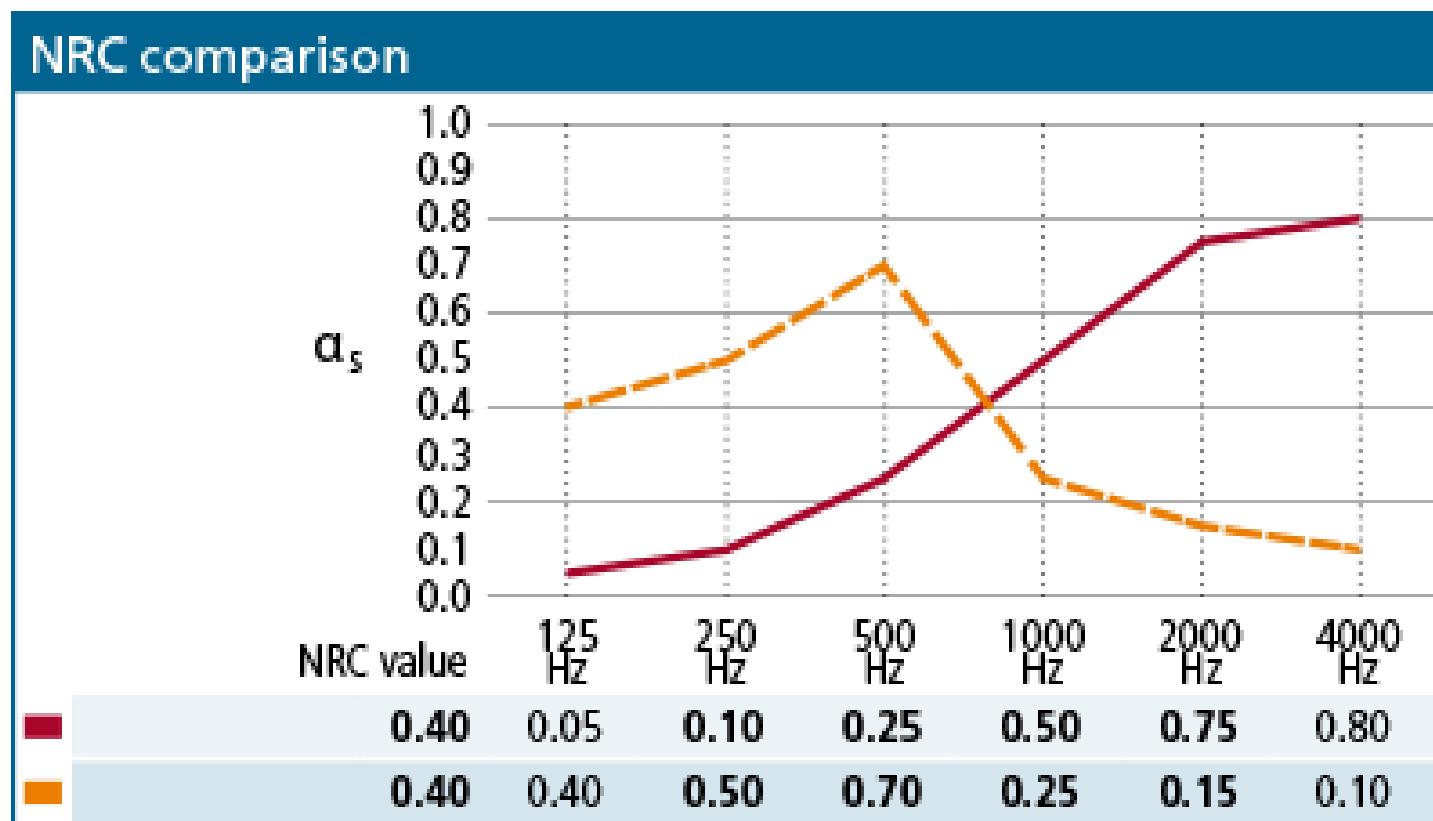
$$\alpha_{muestra} = 55,3 \frac{V}{c} \frac{1}{S_{muestra}} \left(\frac{1}{T_{Rmuestra}} - \frac{1}{T_{Rvacia}} \right) + \alpha_{camara}$$

- Se define el NRC (Noise Control Coefficient) por

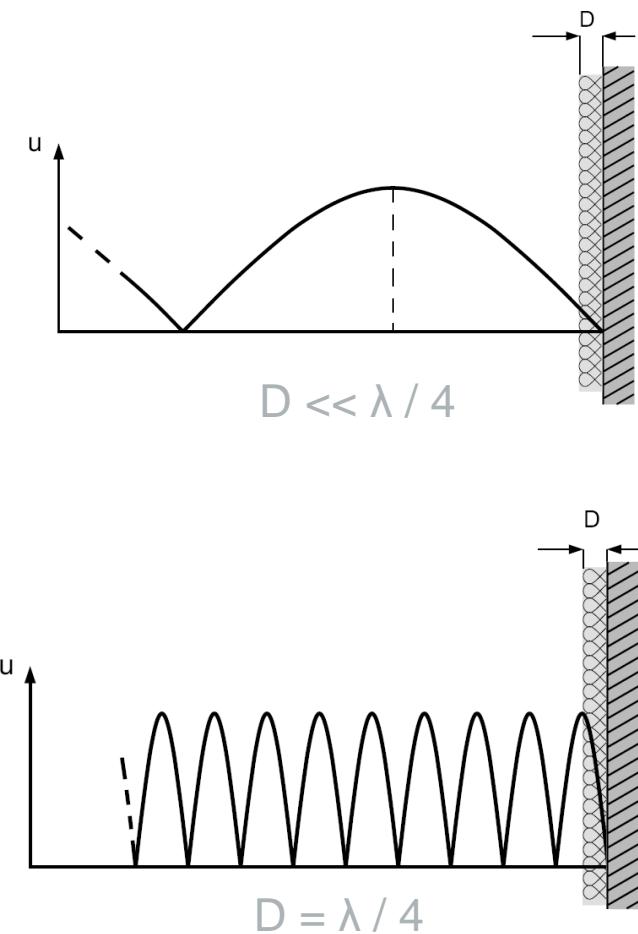
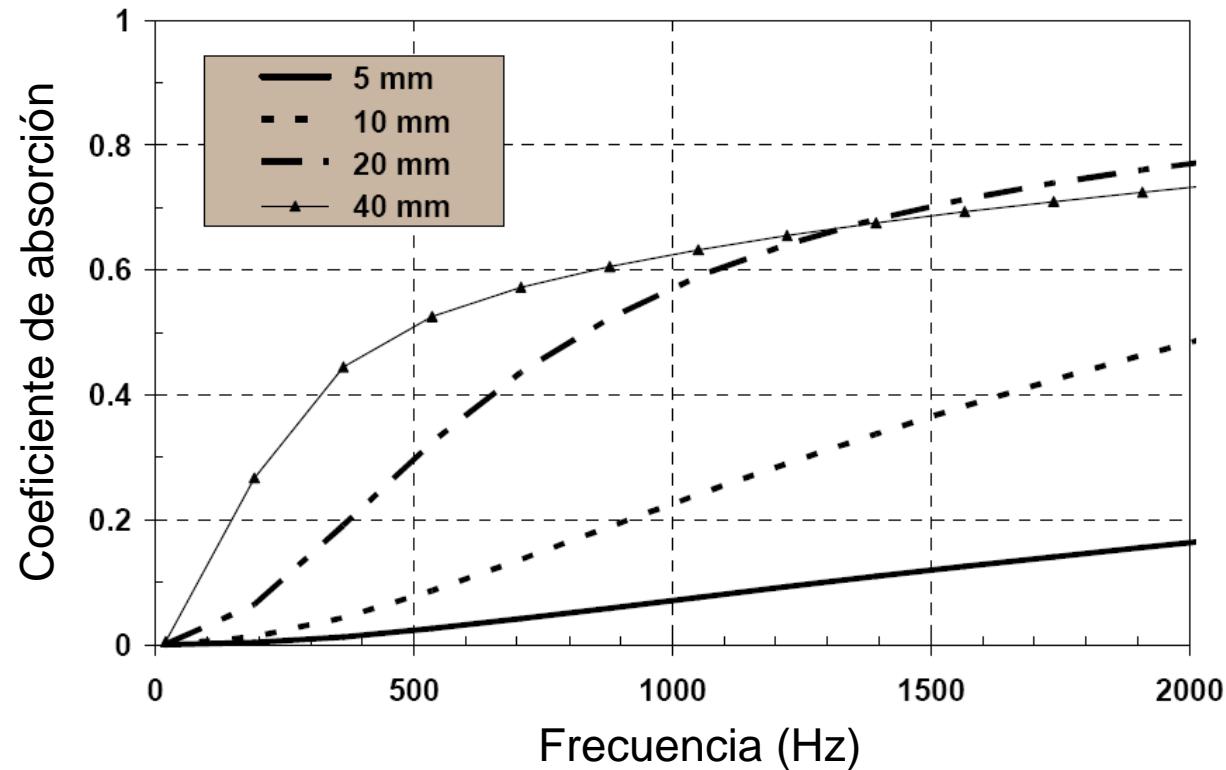
$$NRC = \frac{\alpha(250Hz) + \alpha(500Hz) + \alpha(1kHz) + \alpha(2kHz)}{4}$$

- Es un parámetro estándar utilizado por los fabricantes de materiales acústicos.

- Comparación de dos materiales con mismo valor NRC:
 - Uno está más adaptado al rango de la voz humana que el otro. La Elección de un material siempre debe hacerse mirando su absorción por banda de octava de acuerdo al uso que requerido.



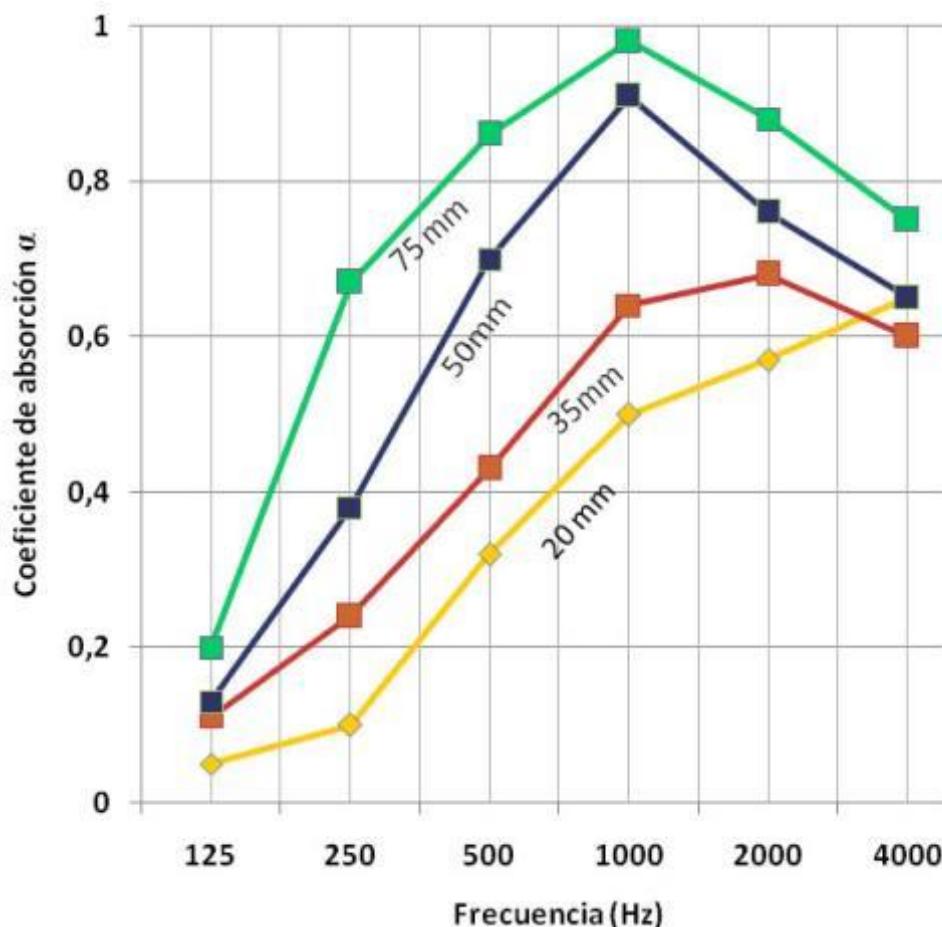
- Efecto de los parámetros sobre la absorción
 - Efecto del espesor del material:



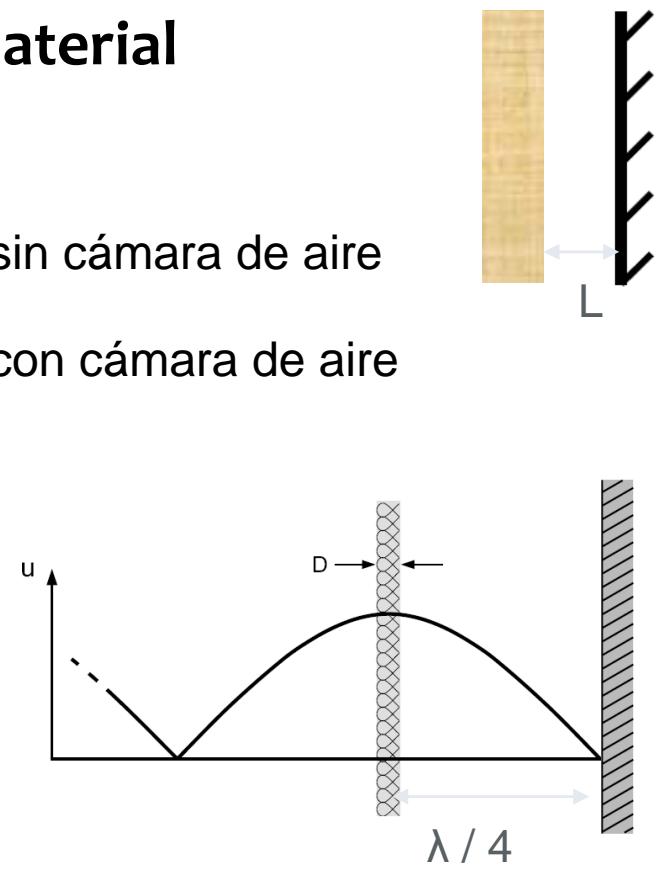
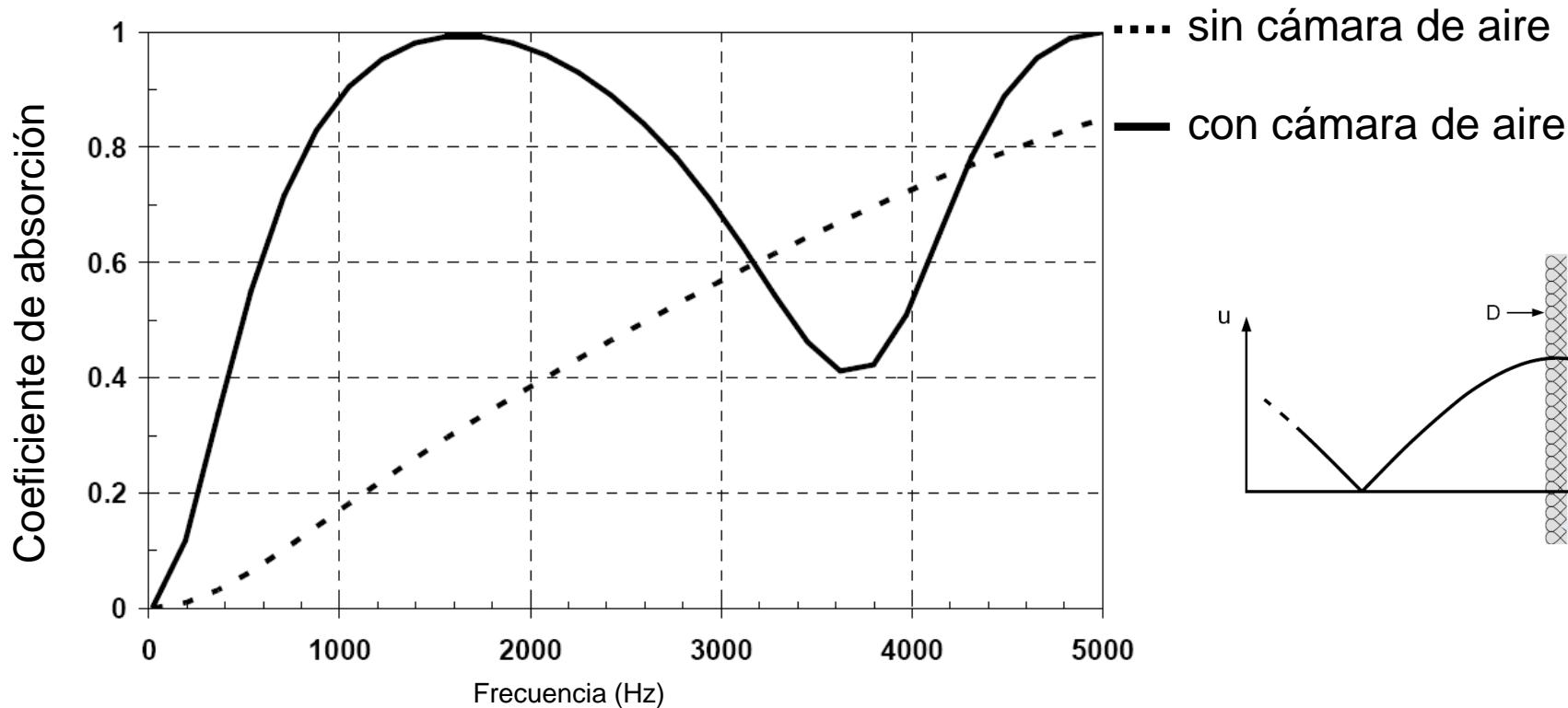
- **Variación de la absorción en función del espesor del material**
 - Muchas veces los absorbentes porosos son llamados absorbentes de velocidad. La **máxima eficacia de absorción** se obtiene cuando la onda (partículas en movimiento) está dentro del material en los puntos de **máxima velocidad**, ya que así existe una fricción máxima y por tanto, máxima absorción.
 - Si se analiza el comportamiento a partir de la onda de velocidad, estudiando el caso para una onda de una única frecuencia, se encuentra un cero de velocidad en el punto en que la onda llega a la pared rígida (impedancia infinita, movimiento nulo) y, por lo tanto, se encuentra el **primer máximo de velocidad** a una distancia igual a $\lambda/4$ de la pared.
 - De todas formas, pocas veces se podrá colocar los absorbentes a una distancia $\lambda/4$ de la frecuencia que se quiere absorber, pues son distancias muy grandes para el caso de aplicación a baja frecuencia.

- Variación de la absorción en función del espesor del material**

Ejemplo: coeficiente de absorción de un material fonoabsorbente para diferentes espesores.



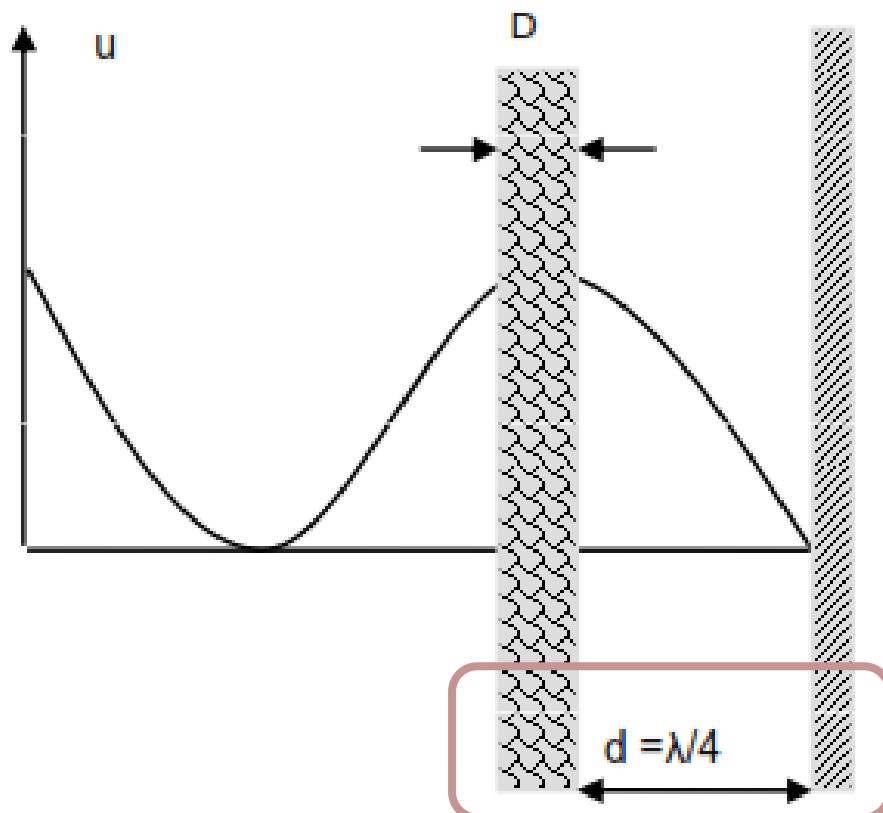
- Efecto de una cámara de aire entre el material absorbente y una pared rígida:



Colocar el material a esa distancia ayuda a aumentar la absorción, en comparación con la obtenida colocando el material pegado a la pared. El aumento es más notable para frecuencias bajas y medias. A alta frecuencia, puede perderse algo de eficacia.

- **Efecto de una cámara de aire:**

- Si se pretenden obtener coeficientes de absorción muy elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material de espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared.



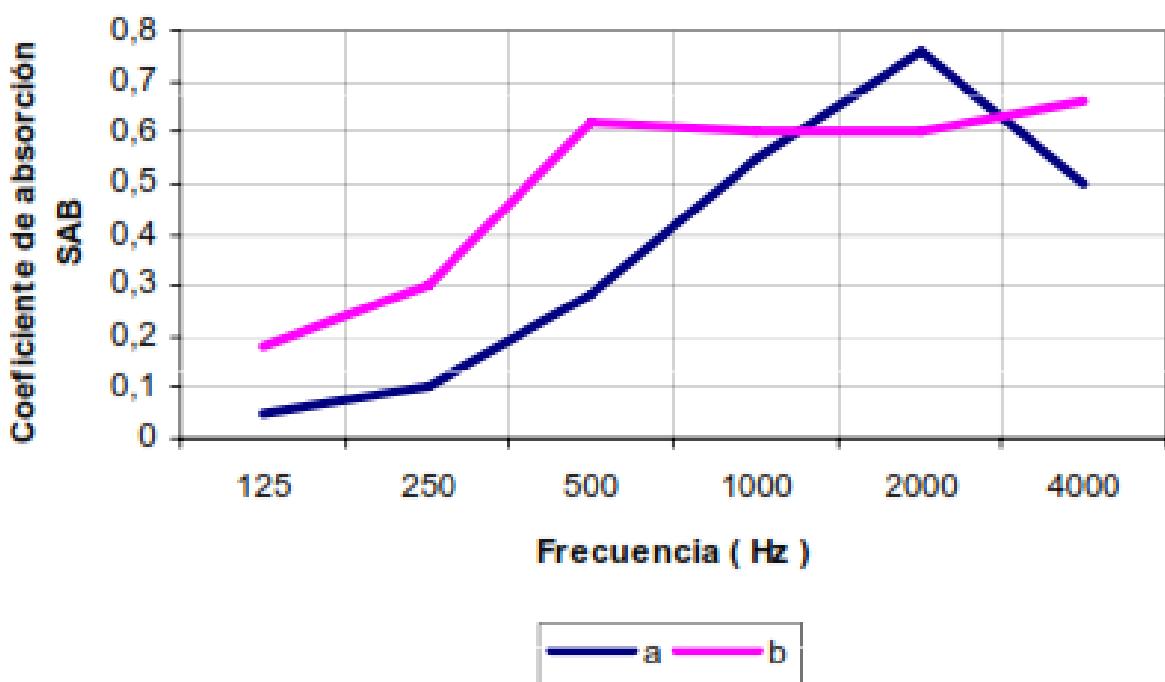
La máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia d (del material a la pared) sea igual a $\lambda/4$.

Para aumentar la absorción a bajas y medias frecuencias será necesario incrementar la separación entre el material y la pared.

- **Efecto de una cámara de aire:**

- Este efecto puede comprobarse con frecuencia en el caso de las **cortinas**. Una cortina extendida sobre una pared, absorberá mucho menos que una cortina colocada a cierta distancia de ella. Si además la cortina está **fruncida**, la **absorción puede aumentar** significativamente. Todo esto, debe tenerse en cuenta (condiciones de montaje).

Ejemplo: coeficiente de absorción de una cortina fruncida 180%, montada de formas distintas, adosada a la pared y con una separación media de 14 cm de la misma. Como era de esperar al separar de la pared la cortina, aumenta la absorción a bajas frecuencias y además el alto porcentaje de fruncido suaviza la curva de absorción.



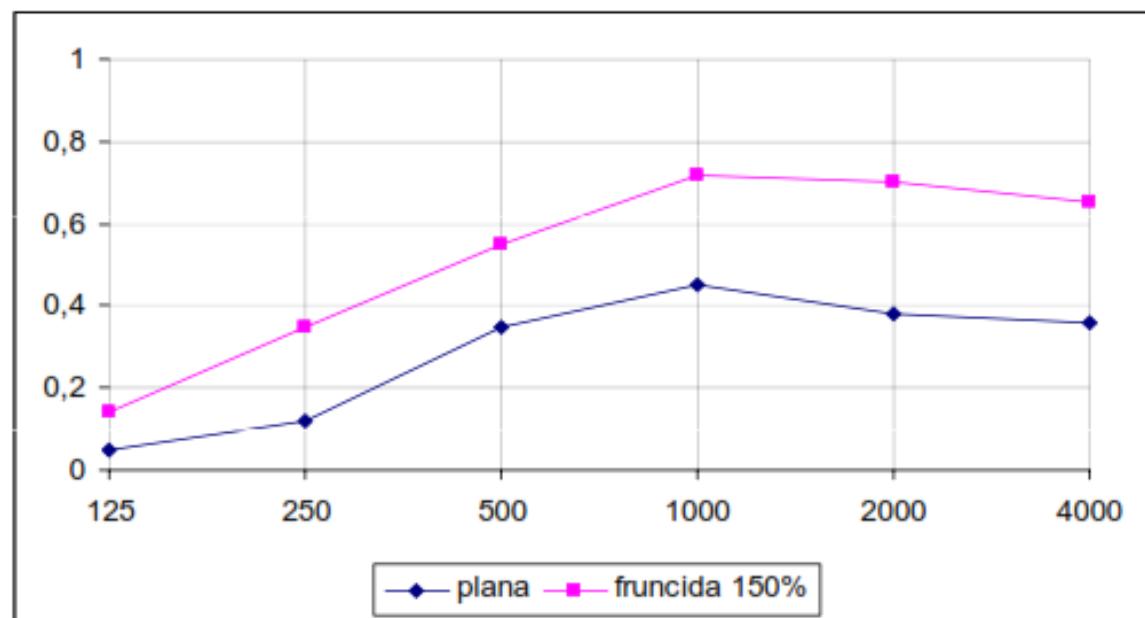
- a) Sobre la pared
- b) Separada un promedio de 14 cm de la pared

- Efecto de una cámara de aire:**

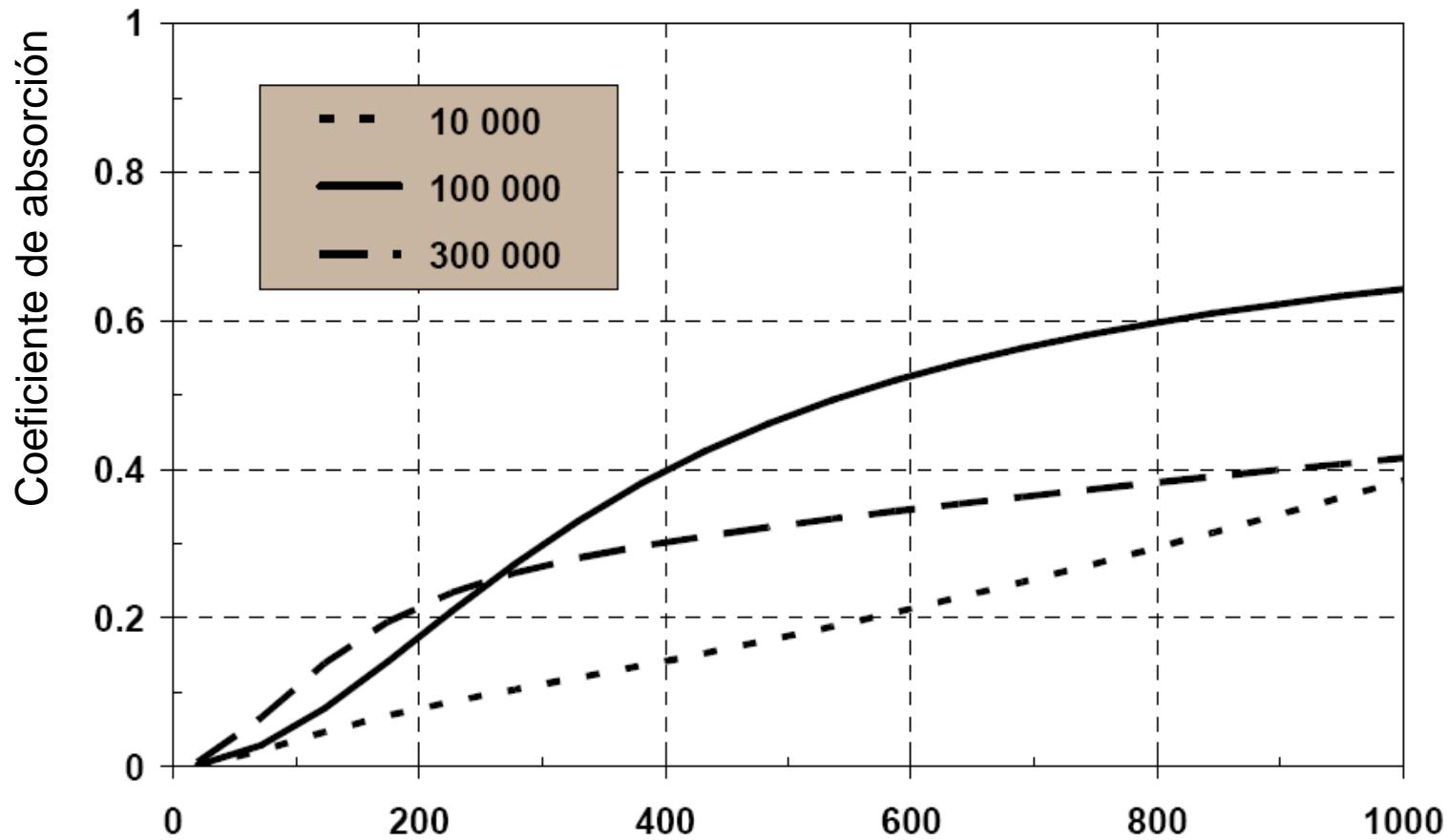
Ejemplo: suavizado de la curva de absorción comparando la misma cortina de algodón de 620 g/m², plana a la pared y fruncida al 150%

Es importante tener en cuenta este efecto e intentar, siempre que sea posible, crear cámaras de aire, aunque sean pequeñas, para obtener mayor absorción de los materiales absorbentes.

En la práctica se recomienda colocar el material en forma de zigzag con el objeto de tener una distancia variable entre el material y la pared y así suavizar las irregularidades del coeficiente de absorción.

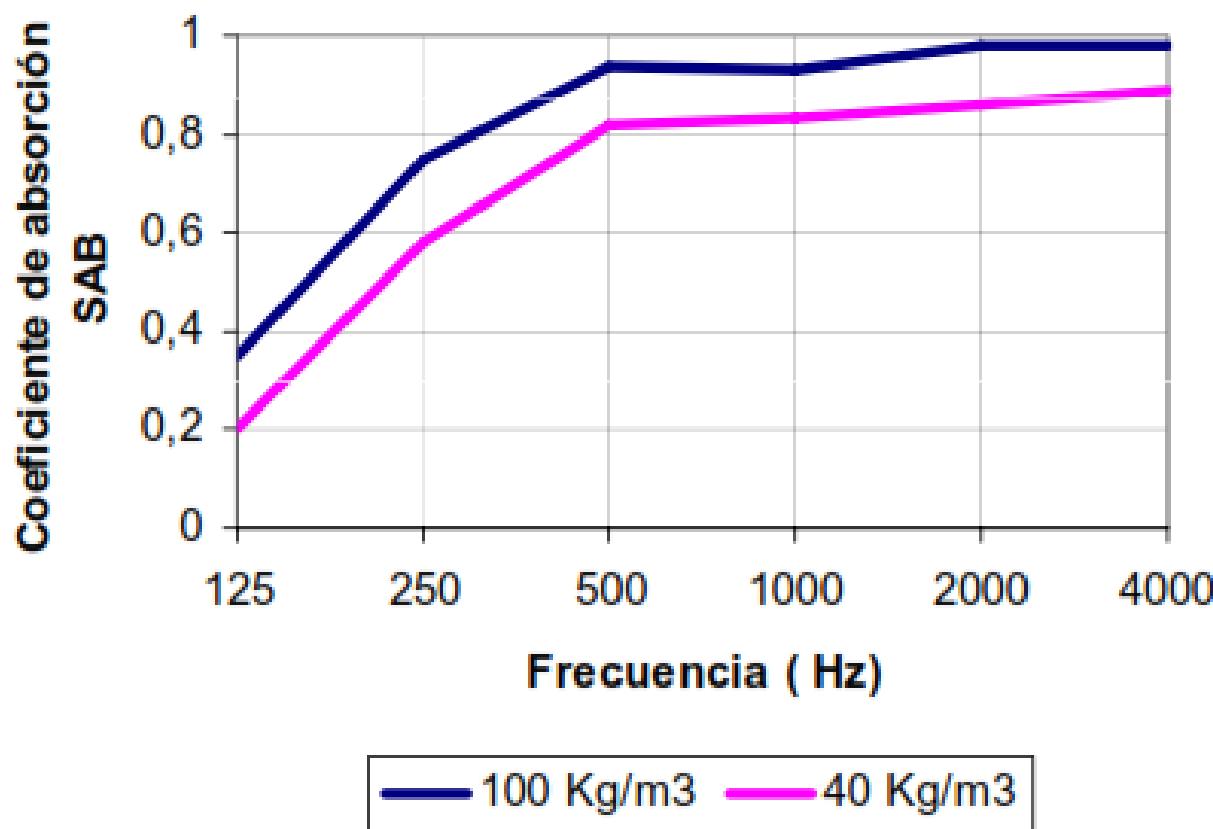


- **Efecto de la resistencia del material al paso del aire:**
(tiene que ver con la densidad del material)

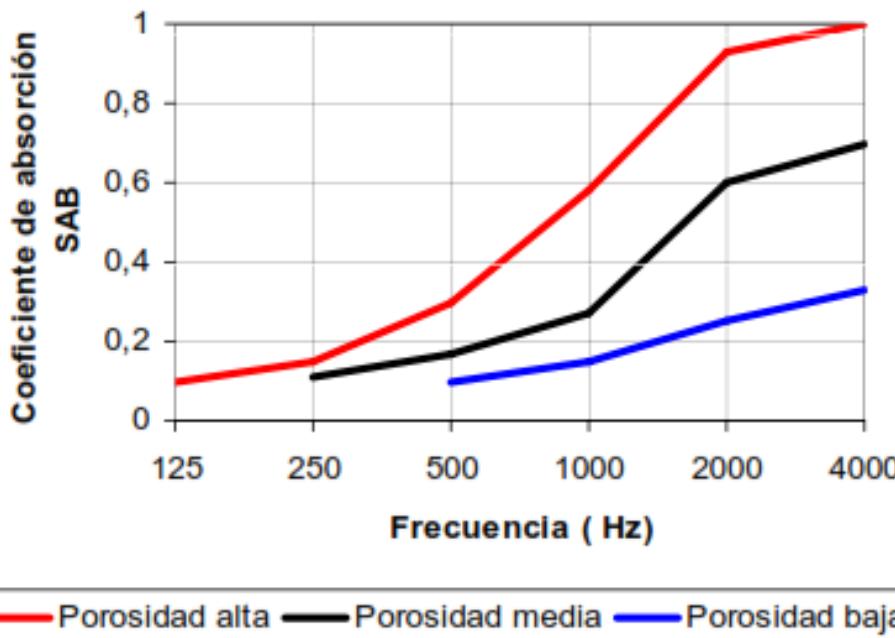


- **Variación de la absorción en función de la densidad del material**
 - Si la densidad del material es baja existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña.
 - A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de la absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.
 - Desde un punto de vista práctico se aconseja que estos materiales tengan una densidad situada aproximadamente, entre **40 y 70 kg/m³**, no **debiéndose superar** en ningún caso los **100 kg/m³**.

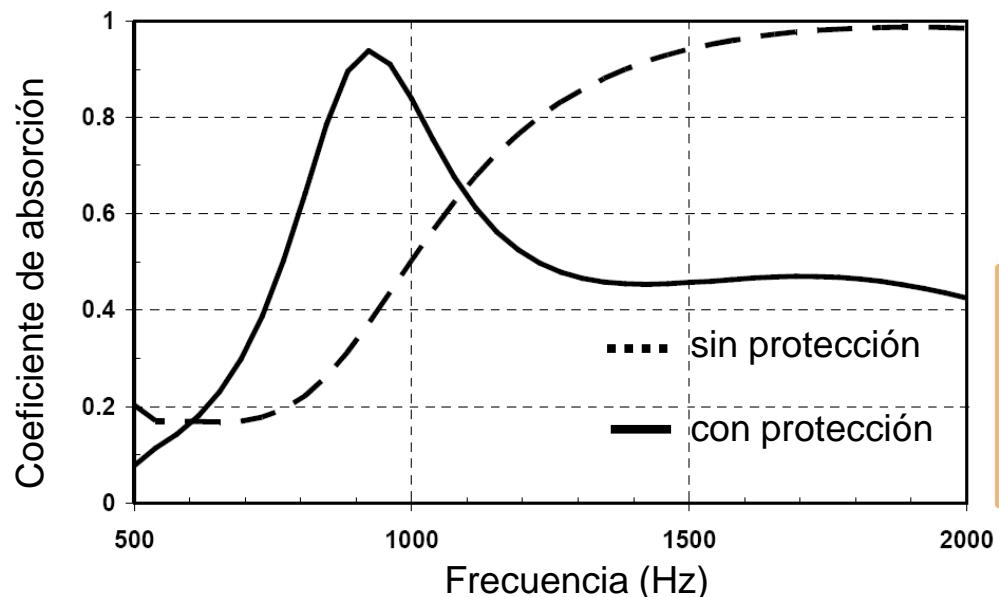
- **Variación de la absorción en función de la densidad del material**
 - Ejemplo: valores de los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm



- **Variación de la absorción en función de la porosidad del material**
 - Al aumentar la porosidad de un material también aumenta la absorción a todas las frecuencias.
 - Este efecto, era de esperar ya que a medida que se incrementa el grado de porosidad la penetración de la onda incidente es mayor.
 - **Ejemplo:** coeficiente de absorción de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes.



- La forma de un material poroso permite:
 - Aumentar la superficie de absorción efectiva: la onda ve un material mas grande
 - Mejor adaptación en impedancia: evita reflexiones en la cara del material a la vista de la onda acústica
 - Creación de cavidades: efecto de resonador (ayuda a la absorción)
- Efecto de una protección sobre el poroso:



Mejora en frecuencias bajas pero deteriora en frecuencias mas altas

 Una chapa multiperforada con un índice de perforación $> 30\%$ no tiene efecto sobre la absorción

Se utilizan para acondicionar salas en las que, por condiciones higiénicas, no pueden utilizarse materiales porosos. Ejemplos: cocinas, hospitales...

- **Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)**

En muchas ocasiones resulta conveniente cubrir los materiales absorbentes por la cara expuesta al recinto. Los principales motivos son los siguientes:

- Algunos absorbentes porosos producen alergias, picazón, etc.
- Con el tiempo pueden **desprender partículas** que pueden llegar a **contaminar el aire** de la sala
- Si los materiales están al alcance del público existe el peligro de que puedan ser dañados (como en el laboratorio)
- El arquitecto habitualmente desea ocultarlos por motivos estéticos

Los **recubrimientos** más comunes son:

- Velo acústico transparente
- Superficie microporosa
- Placa rígida de mortero poroso a base de granos de mármol, piedras naturales o cuarzo pigmentado
- Placa de viruta de madera fina aglomerada con magnesita o cemento
- Lámina de plástico o papel

En algunos casos el recubrimiento es acústicamente transparente y en otros varía la absorción del material que protege. La característica de absorción debe darse con la protección.

- **Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)**
 - Ejemplo de paneles de lana de vidrio de alta densidad recubiertos con material microporoso.
 - Propiedades:
 - Se puede lavar sin sufrir ningún deterioro.
 - Se puede curvar.
 - Se puede instalar en forma de falso techo o cielorraso absorbente.

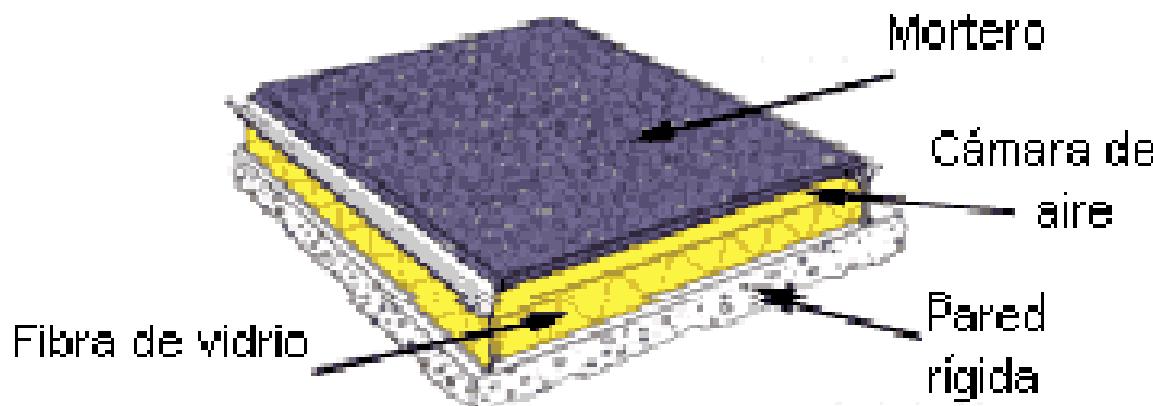


- **Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)**

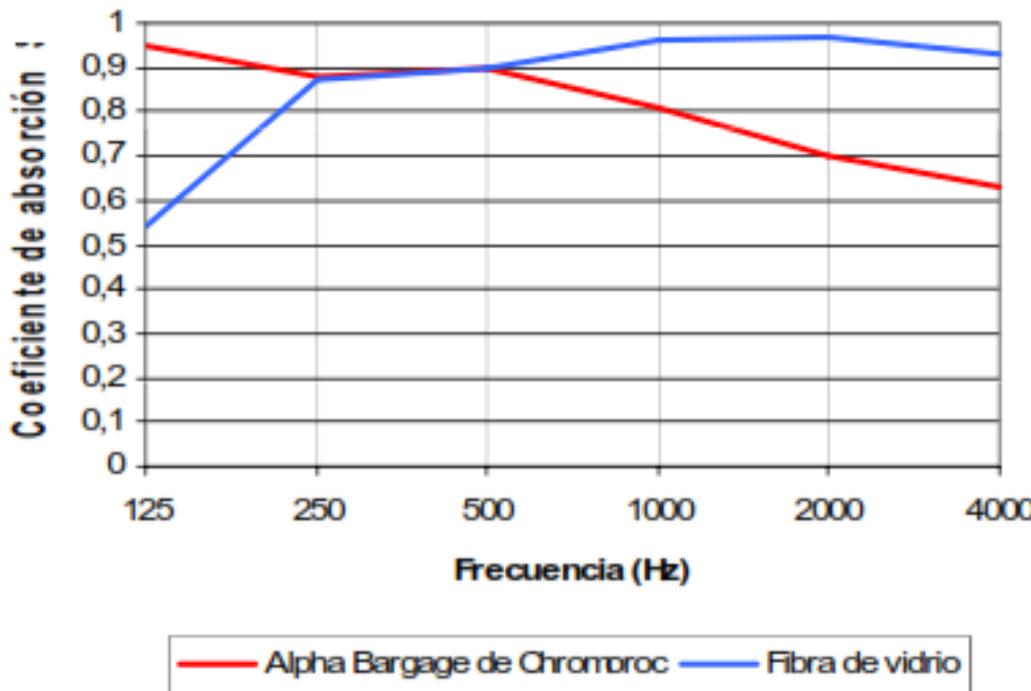
Ejemplo de placa rígida de mortero poroso: placa de mortero poroso a base de piedras naturales aglomeradas con resina.



Croquis de un conjunto formado por una placa del tipo anterior colocada a una distancia de 150 mm de la pared. La cavidad entre la pared y la placa está rellena de lana de vidrio. También se muestra la gráfica de los valores del coeficiente de absorción del conjunto.

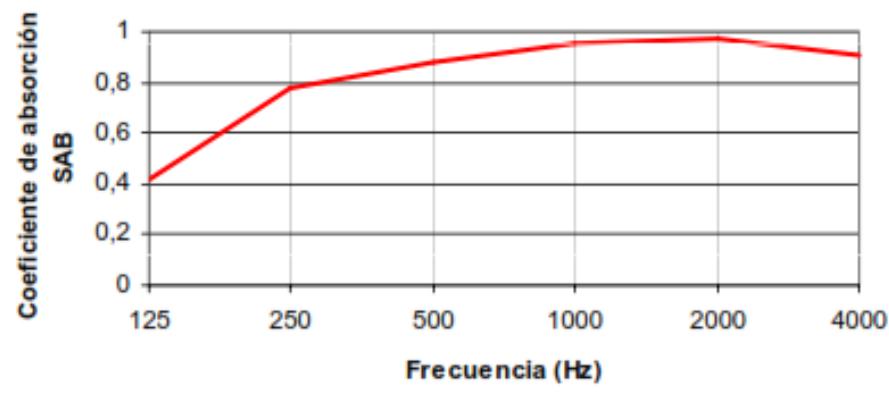
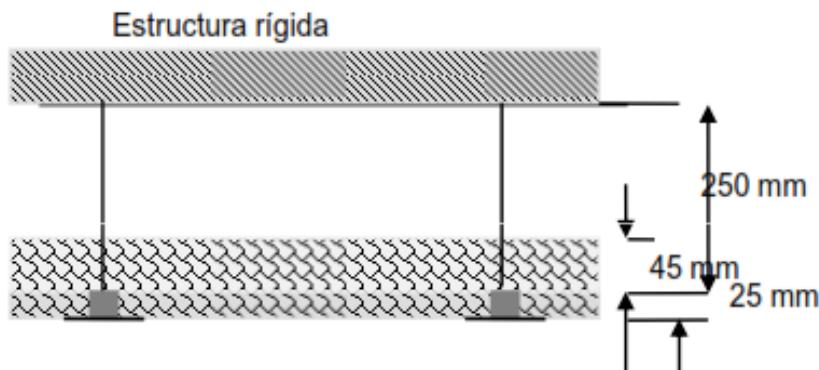


- **Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)**



Según se observa, la absorción conseguida es muy elevada a bajas y a medias frecuencias. Esto es debido a que la placa también contribuye a la absorción global del conjunto en estas bandas. En cambio a altas frecuencias se observa una disminución menor respecto a la que presentaría la lana de vidrio sin ningún tipo de protección, esto es debido al obstáculo que presenta la placa al paso de la onda a dichas frecuencias (las longitudes de onda son muy inferiores a las correspondientes a bajas frecuencias).

- **Variación de la absorción en función del revestimiento (protección de los absorbentes porosos)**
 - Ejemplo: placa de viruta de madera aglomerada con magnesita
 - Croquis de un posible conjunto formado por placas de 25 mm de espesor con cavidad de aire de 250 mm y lana de vidrio de 45 mm y coeficiente de absorción del conjunto.



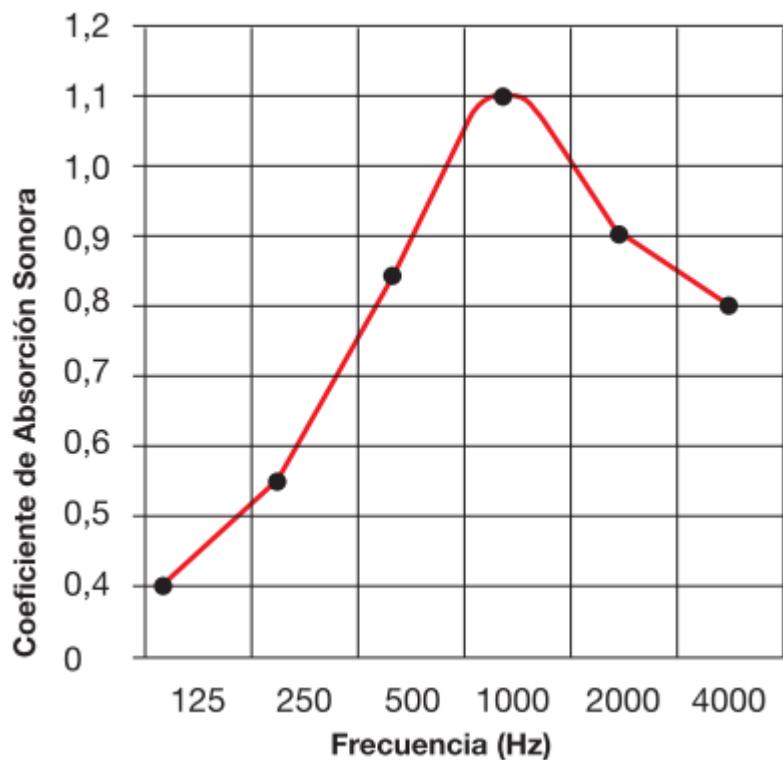
- **Protecciones acústicamente transparentes basadas en chapas perforadas:**
 - Deben tener porosidad > 30%
 - Separación entre agujeros < $\lambda/2$
 - Longitud agujero (grosor de la chapa) < $\lambda/4$

- **Materiales flexibles**

- Estos materiales se hallan cubiertos, generalmente, por una superficie no porosa muy ligera ($m < 0.1 \text{ Kg/m}^2$) siendo el núcleo interior del material suficientemente poroso como para conseguir la flexibilidad deseada. La absorción se debe a fricciones internas del esqueleto elástico, a la fricción del aire interior y al intercambio de calor entre el material poroso (o flexible) y la cubierta.
- La absorción del material depende de los siguientes parámetros:
 - *Espesor de la capa de material*
 - *Frecuencia del sonido*
 - *Resistencia al paso del flujo de aire*
 - *Porosidad del material*
 - *Factor de estructura*
 - *Densidad superficial de la superficie que cubre*
 - *Rigidez y densidad del esqueleto*

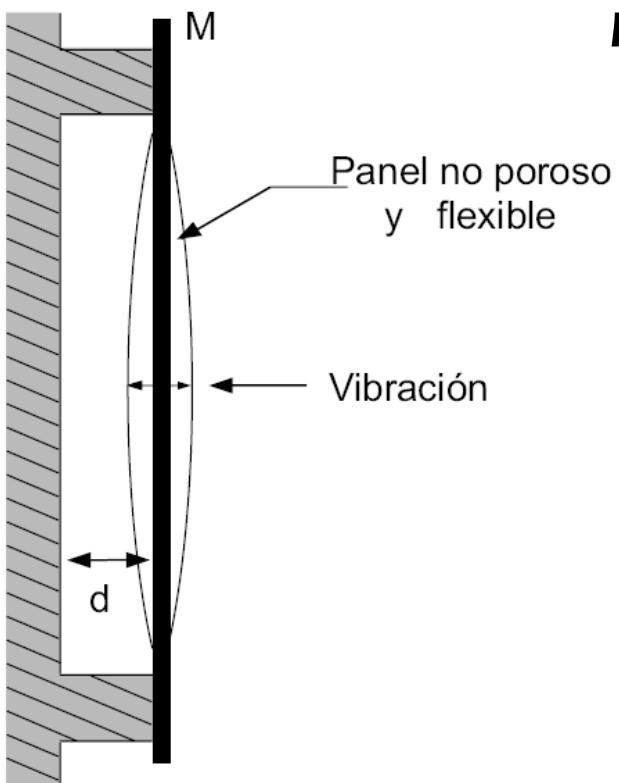
- Ejemplos de materiales absorbentes flexibles**

- Material fonoabsorbente con protección de plástico.



Coeficiente de absorción de un panel de 50 mm de espesor y de 32 kg/m^3 de densidad

- La absorción generada por los resonadores
 - El resonador de membrana o diafragmático
 - Panel no poroso y flexible: en muchos casos hecho de madera montada a una cierta distancia de pared rígida (cavidad de aire)



Principio: sistema Masa / Resorte

masa = panel

resorte = aire en la cavidad

La frecuencia de resonancia esta dada por:

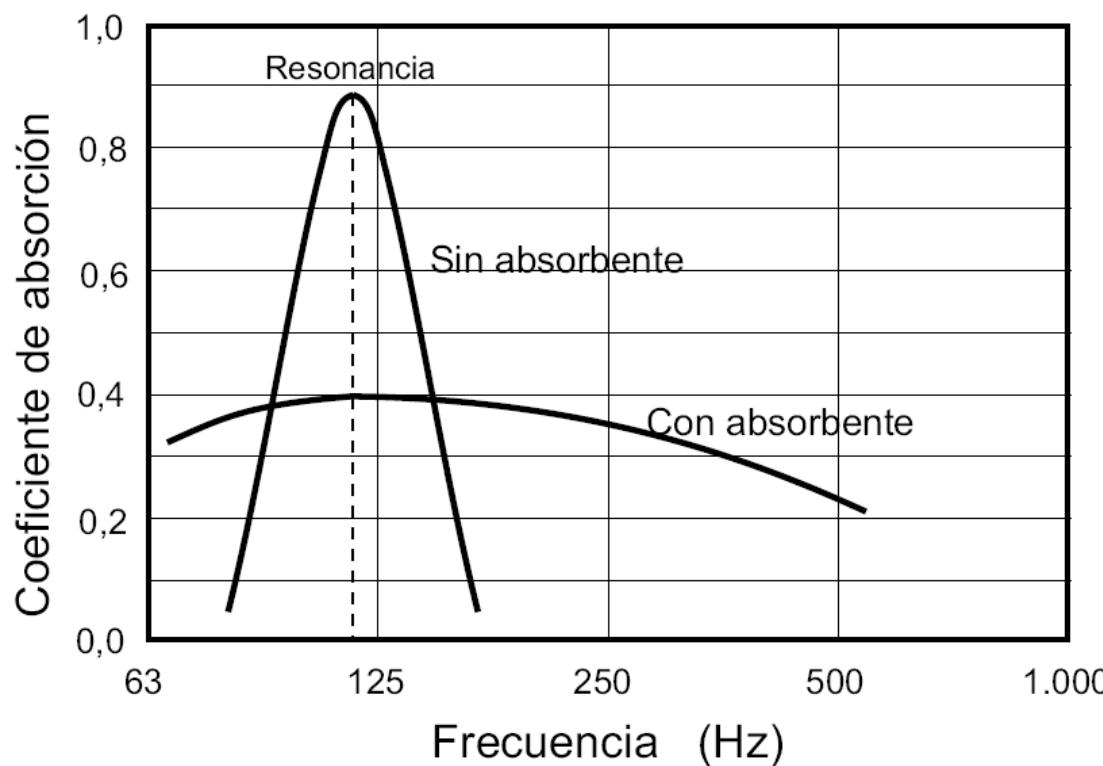
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{Md}}$$

Su coeficiente de absorción se aproxima por:

$$\alpha = \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right)^2$$

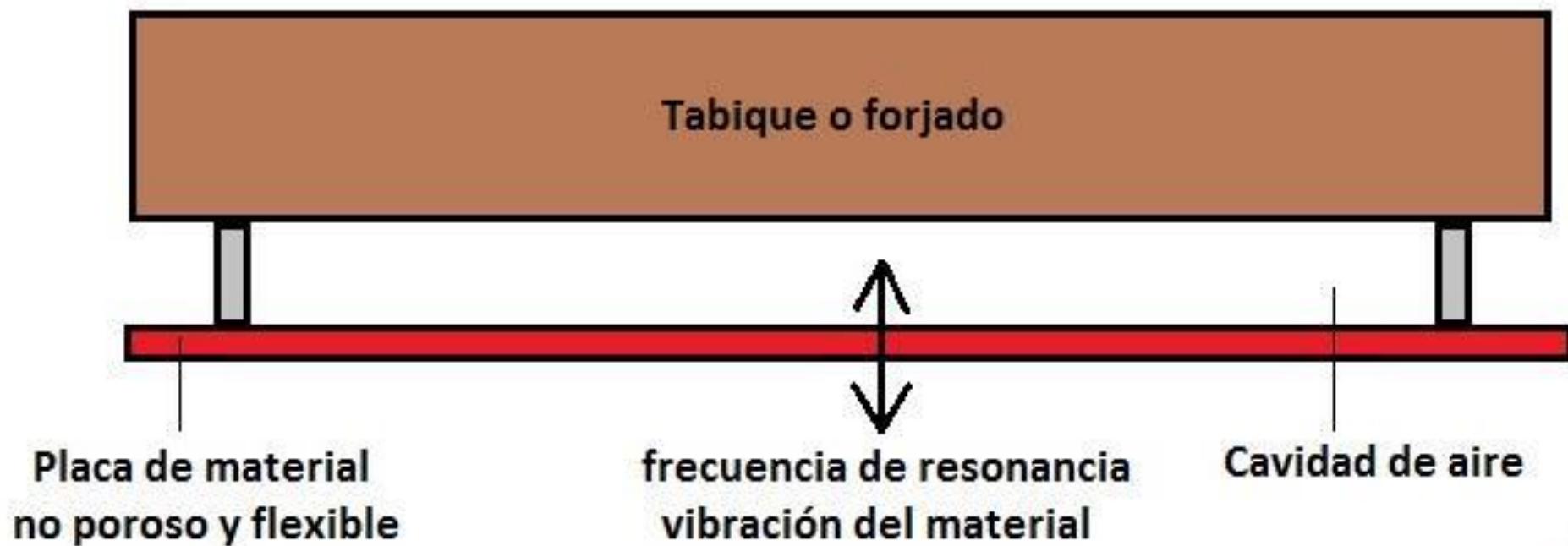
con **M** la masa por unidad de superficie del panel [kg/m²]

- Ventajas:
 - Absorción generada en bajas frecuencias
- Inconveniente:
 - Absorción muy selectiva, utilización de una material poroso en la cavidad de aire para aliviar la curva del coeficiente de absorción.



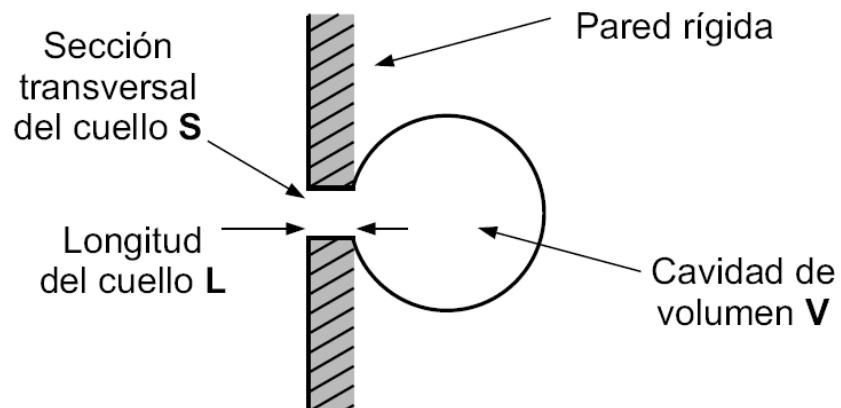
- Ejemplos de materiales absorbentes tipo resonador de membrana**

- Láminas de madera, de plástico u otro material
- Láminas de material absorbente
- Ventanas o puertas de cristal
- En general, paneles que tengan la posibilidad de vibrar



- **El Resonador de Helmholtz**

- Cavidad de aire conectada al ambiente por una abertura (o cuello) estrecha
- Hipótesis: $\lambda \gg L, S \Rightarrow$ no hay resonancias en el interior del cuello mismo.



Principio: perdidas por fricciones al nivel del cuello. Absorción máxima a la frecuencia de resonancia f_0 que corresponde a una velocidad máxima del aire. La frecuencia de resonancia es dada por:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(L + \Delta L)}}$$

con $S = \pi a^2$

y a el radio del cuello

Factor de corrección
del cuello

- **Estudio del resonador de Helmholtz**
 - Si $\lambda \gg L$: fluido en el cuello se mueve como una unidad = elemento de **Masa**.
 - Si $\lambda \gg V/3$: presión acústica en la cavidad = elemento de **Rigidez**.
 - Si $\lambda \gg S/2$: apertura radia sonido como fuente simple. En el cuello hay perdidas de tipo viscoso (mientras diámetro inferiores a 1 cm) = elemento de **Resistencia**.
- **El elemento de Masa:**
 - Tiene una masa efectiva total de $m = \rho_0 S L'$
 - L' representa la longitud efectiva del cuello: debido a los movimientos de la masa de aire al nivel del cuello ese mismo cuello es visto «más largo» por la onda acústica.
 - → Se aplica un factor de corrección debido al radio de la boca o orificio del resonador.

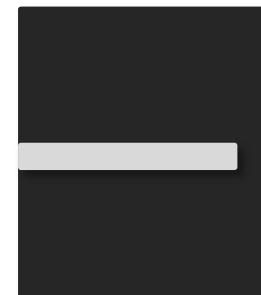
Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

4. La absorción acústica

- Extremidad = carga adicional al pistón que simbolizaría la masa de aire dentro del cuello.
- Debido al tipo de terminación este factor de corrección varia:
 1. Tubo circular con $L \gg a$: $L' = L + 0,61a$
 2. Para un orificio sin bordes: $L' = L + 0,82a$
 3. Para un resonador de Helmholtz: $L' = L + 0,61a + 0,82a$
 4. Para un de un sistema con $L \ll a$ (caso general de un resonador de Helmholtz «práctico»): $L' = L + 1,57a$



1.



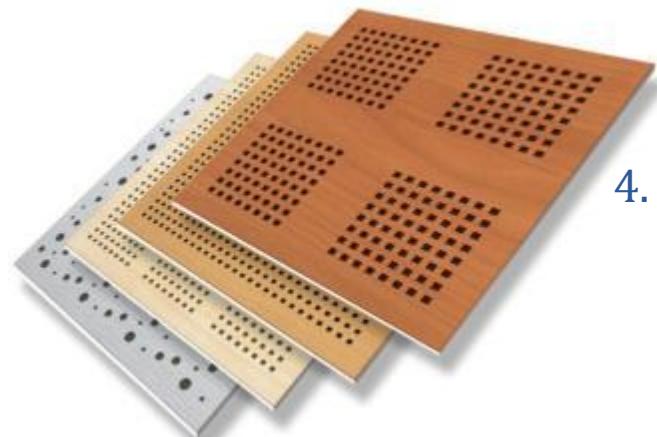
2.



3.

- Estas correcciones se realizan debido al comportamiento reactivo de la impedancia del aire.

<http://www.fonema.se/mouthcorr/mouthcorr.htm>



4.

Estudio del resonador de Helmholtz

El elemento de Rigidez

Al considerar la masa de aire del cuello como un pistón que sella el volumen interior, los movimientos del pistón (ξ) provocan cambios del volumen de la cavidad ($\Delta V = -S\xi$), a partir de la condensación s:

$$s = \frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V} = \frac{S\xi}{V}$$

Sabiendo

$$p = \rho_0 c^2 s = \frac{\rho_0 c^2 S}{V} \xi$$

La fuerza requerida para mantener el desplazamiento es

$$F = \frac{\rho_0 c^2 S}{V} \xi$$

Y, por tanto (siguiendo la Ley de Hooke de un muelle e identificando términos, la rigidez efectiva es

$$K = \frac{\rho_0 c^2 S}{V}$$

Estudio del resonador de Helmholtz

El elemento de Resistencia

El fluido que se mueve en el cuello radia sonido en el medio circundante de la misma forma que el tubo con el extremo abierto. Para $\lambda \gg a$, la resistencia de radiación con pestaña es:

$$R_r = \rho_0 c \frac{K^2 S^2}{2\pi}$$

Y sin pestaña

$$R_r = \rho_0 c \frac{K^2 S^2}{4\pi}$$

La frecuencia de resonancia

Cuando una onda sonora de amplitud P , con fuerza P^*S , incide sobre el resonador, la ecuación diferencial resultante para el desplazamiento (hacia dentro) del fluido del cuello es:

$$m \frac{d^2\zeta}{dt^2} + R_r \frac{d\zeta}{dt} + K\zeta = SP e^{j\omega t}$$

Esta es la ecuación de un oscilador forzado, por analogía, la impedancia de un resonador de Helmholtz es:

$$Z_m = R_r + j(\omega m - K/\omega)$$

Estudio del resonador de Helmholtz

Así pues, la frecuencia de resonancia, dada en la condición de reactancia cero es:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

Como puede apreciarse, la frecuencia de resonancia no depende de la forma de la cavidad del resonador. Mientras las dimensiones del resonador sean menores a la longitud de onda y la apertura no sea muy grande, la frecuencia viene determinada por el cociente:

$$\frac{S}{L'V}$$

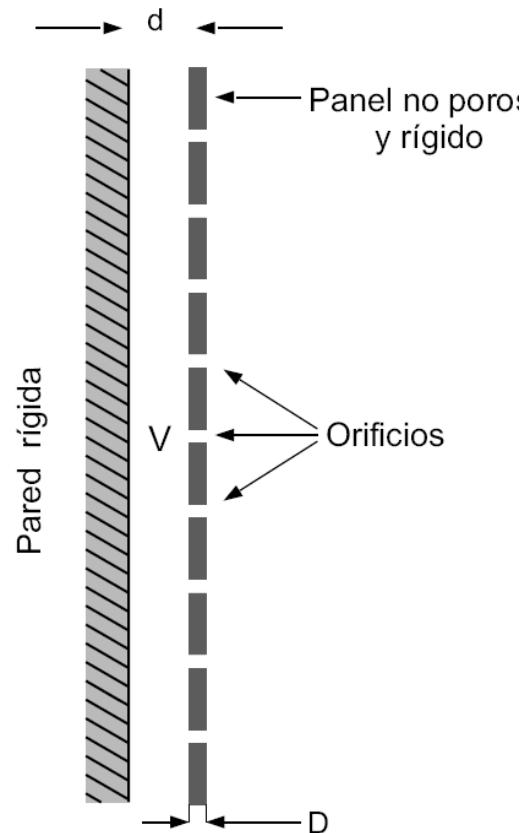
Es conveniente remarcar que esta formulación sirve para un resonador de sección de apertura circular, determinada por el radio a . Cuando la boca del resonador no es circular se suele trabajar con el radio equivalente a la sección dada:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

- Ventajas:
 - Absorción generada en bajas frecuencias
 - Se puede acoplar el efecto de 2 resonadores
 - Se puede utilizar un panel multiperforado frente a una pared rígida para generar un resonador múltiple de Helmholtz (mejora el poder de absorción)
- Frecuencia de resonancia dada por:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{d(D + 1,6a_{eq})}}$$

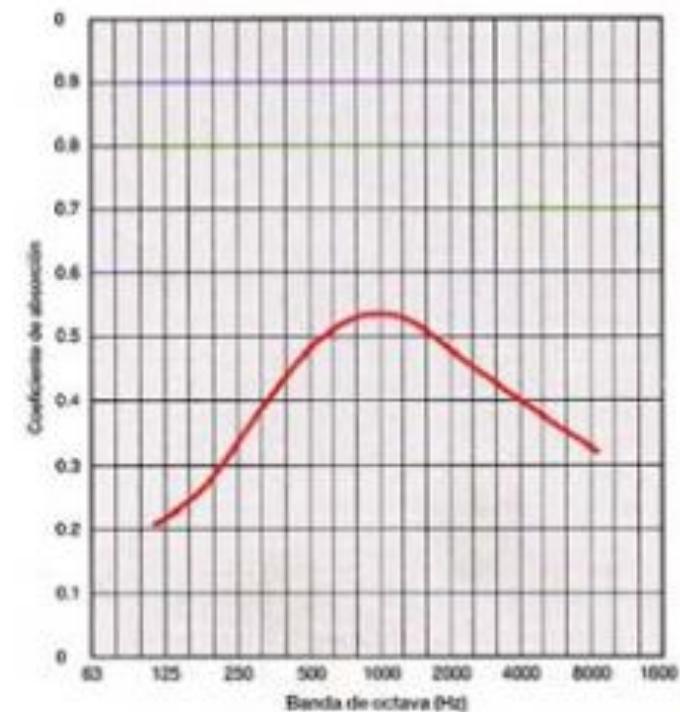
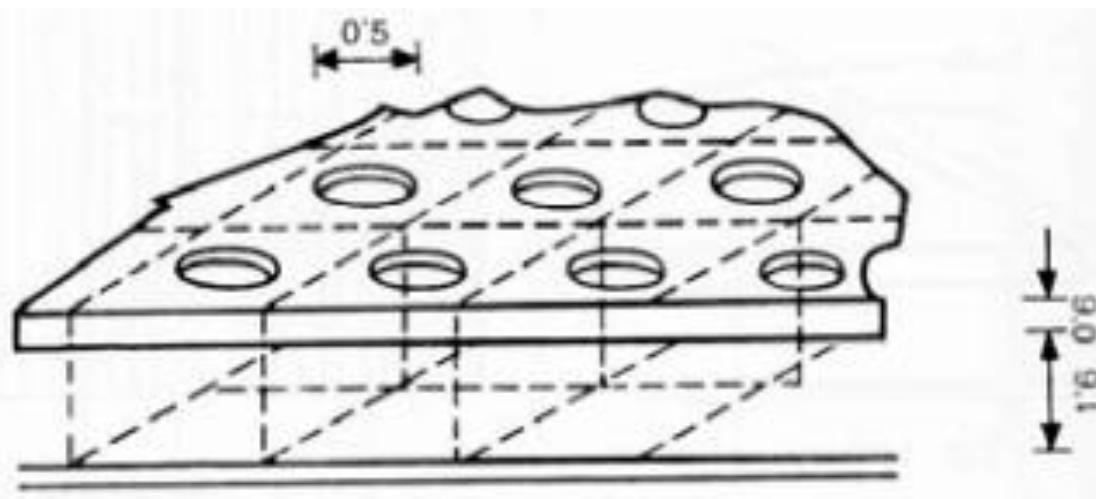
- con **p** el índice de abertura del panel



Resonador múltiple a base de paneles perforados o ranurados

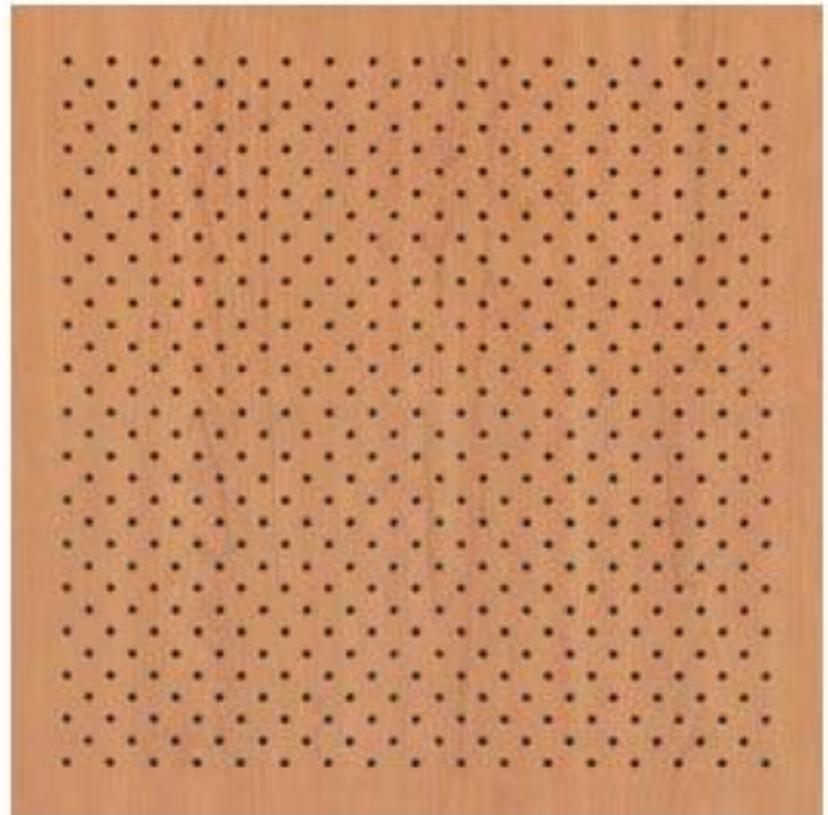
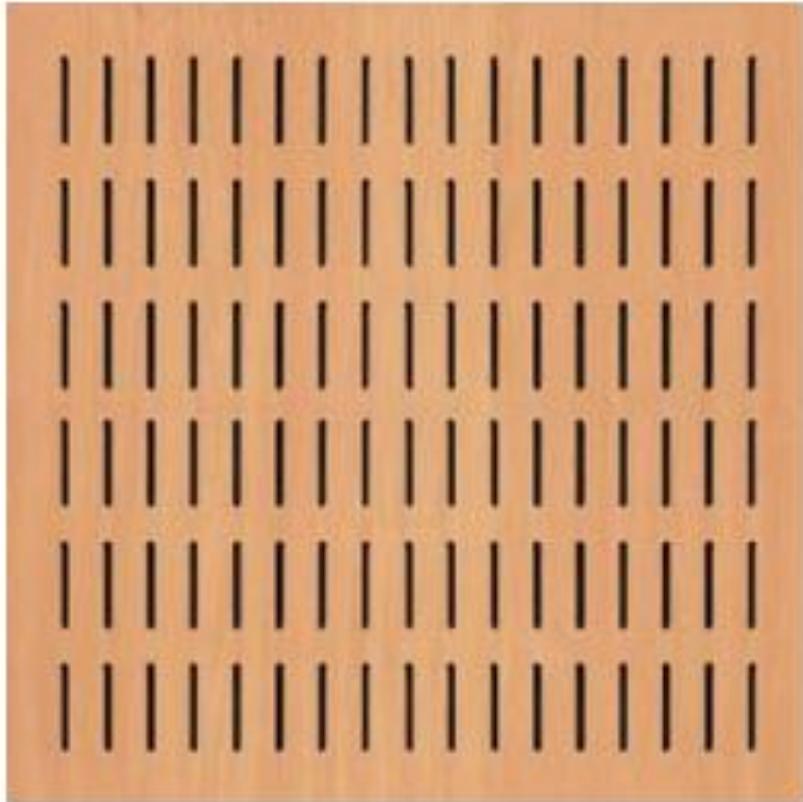
- **Paneles perforados (resonadores de Helmholtz)**

Se basan en placas con perforaciones (tasa perforación baja, inferior al 20%) que forman una cavidad con la pared rígida. La cavidad, generalmente, se rellena de material absorbente poroso. Estos elementos tienen una frecuencia de resonancia. Equivalen a un sistema mecánico masa-muelle: la masa es la del aire dentro de la perforación de la placa que se mueve como un bloque, y el muelle es el aire dentro de la cavidad. Forman un conjunto de resonadores de Helmholtz.



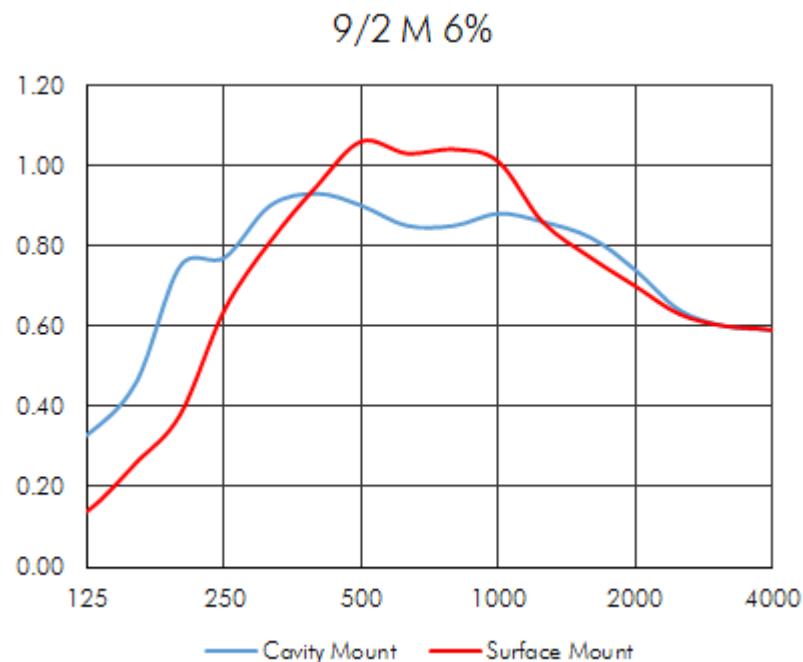
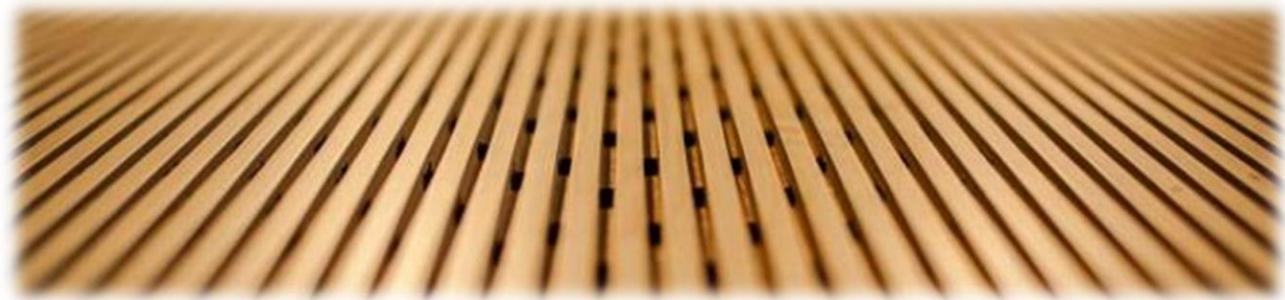
- **Ejemplos de paneles perforados**

Panel multiresonador con perforado tipo lágrima o perforación circular.



- Ejemplos de paneles perforados

Paneles Topakustic:

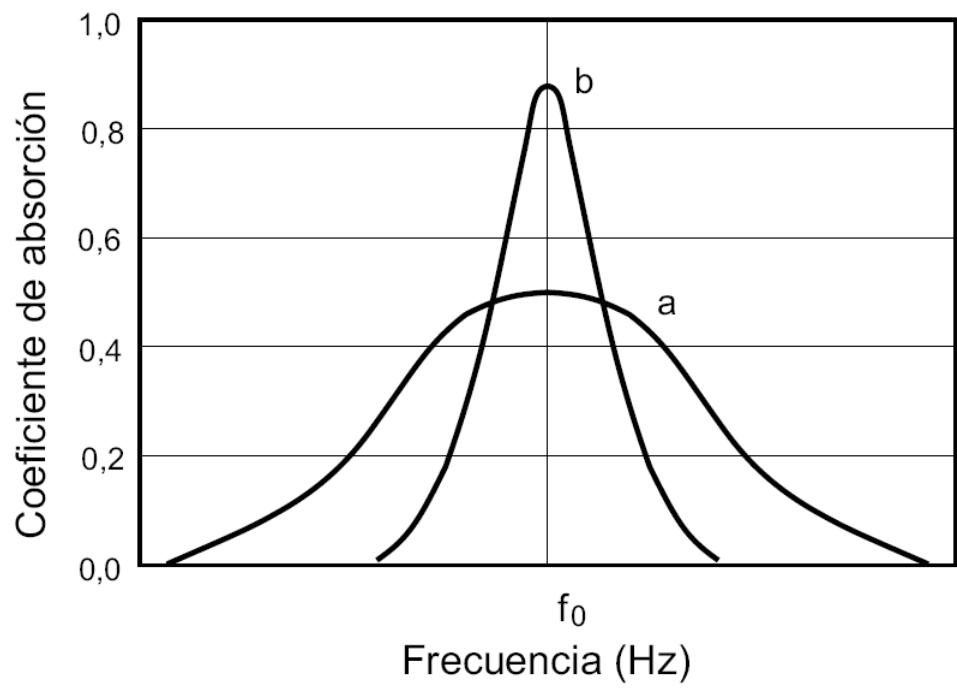
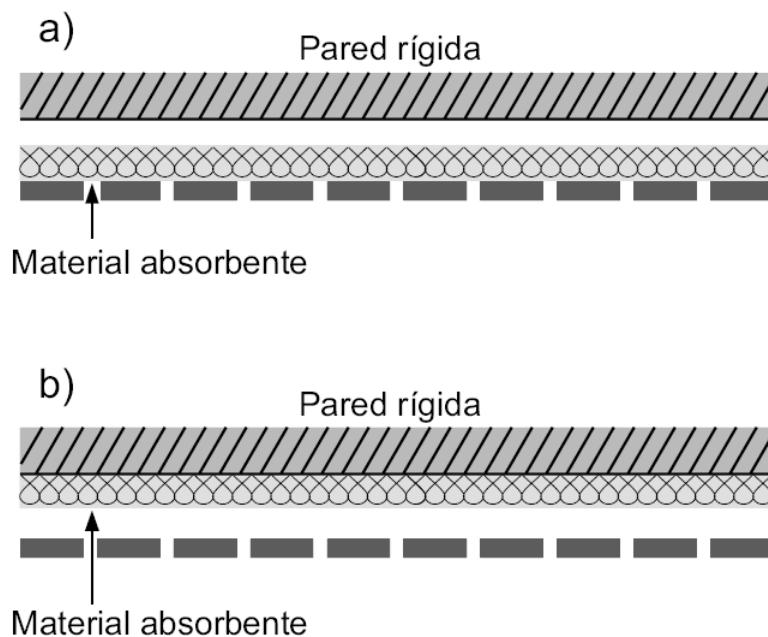


Coeficiente de absorción de un panel de 6% de abertura a **210 mm** y **55 mm** de una superficie rígida

- **Efecto de llenar la cavidad con material absorbente**

- Cuando se coloca el material absorbente poroso (e.g., lanas minerales) en la cavidad de un resonador, se introducen pérdidas en el sistema, se amortigua el sistema. El efecto se traduce en una respuesta menos selectiva y menos efectiva a la frecuencia de resonancia, y en un aumento del ancho de banda de actuación (respuesta más amplia en frecuencia). Además, la frecuencia de resonancia disminuye, debido a un aumento aparente (no real) de la cavidad debido al absorbente.
- Según datos de Beranek et al., para resonadores individuales, la disminución de la frecuencia puede llegar hasta un 85%. Para paneles perforados o conjuntos de resonadores, el efecto del absorbente puede ser más significativo, en cuanto a variación de la frecuencia de resonancia del sistema no amortiguado. Puede verse en la gráfica de los coeficientes de absorción de un resonador simple de cavidad con (violeta) y sin (rojo) absorbente.

- Inconveniente:
 - Absorción muy selectiva, utilización de una material poroso en la cavidad de aire para aliviar la curva del coeficiente de absorción.

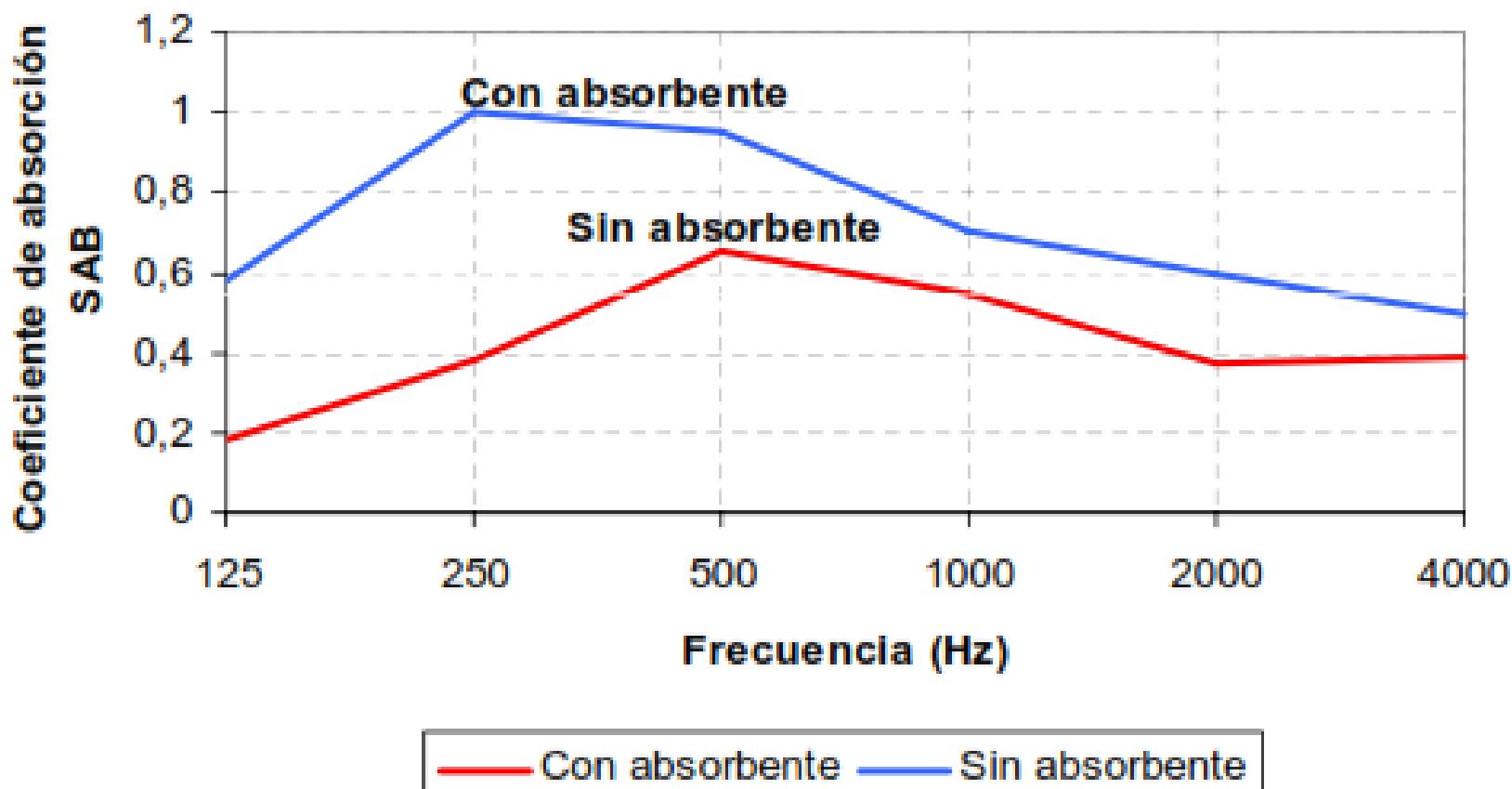


- **Influencia del material absorbente en la cavidad**

- La absorción del panel aumenta cuando se rellena la cavidad (parcial o totalmente) con material absorbente poroso. Como en el resonador individual, el absorbente provoca una disminución de la frecuencia de resonancia debido a un aumento aparente del volumen, aunque en este caso, esta disminución puede ser mucho más significativa.
- Es aconsejable colocar material absorbente en la cavidad. Según se coloque el material pegado al panel o pegado a la pared, la curva de absorción pasa de ser menor selectiva a más selectiva, respectivamente.
- Se presentarán dos curvas en la siguiente diapositiva, una correspondiente al resonador sin absorbente en la cavidad y la otra pertenece al mismo resonador pero con lana de vidrio de 80 mm de espesor en dicha cavidad. La frecuencia teórica del resonador sin absorbente es de 500 Hz.

- **Influencia del material absorbente en la cavidad**

- Absorción de un resonador múltiple, formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado en un 18% y separado de una pared rígida una distancia de 100 mm.

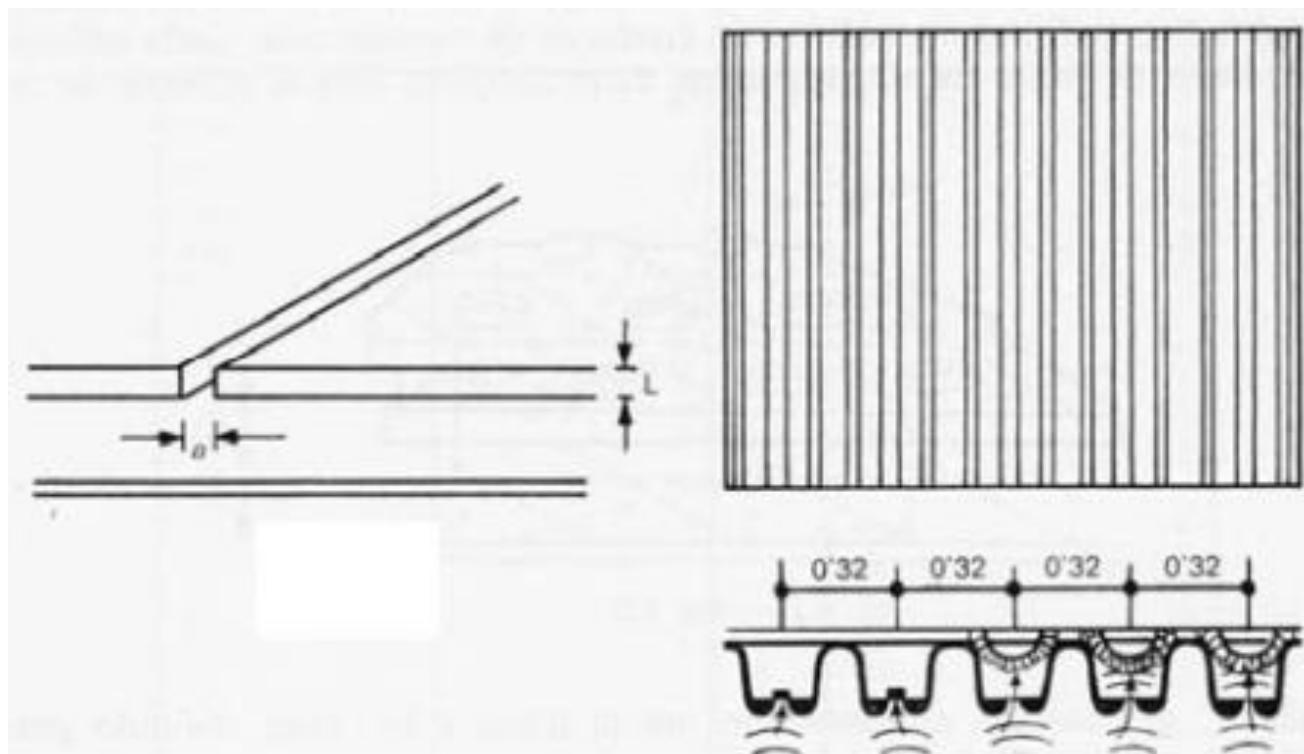


Resonadores lineales

Son paneles perforados con perforaciones en forma de ranuras tal como se muestra en la figura. La forma de calcular la frecuencia de sintonía es:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

Donde S es la suma de secciones transversales de las zonas entre listones ocupada por aire; L, el espesor de un listón; y V, el volumen de la cavidad.

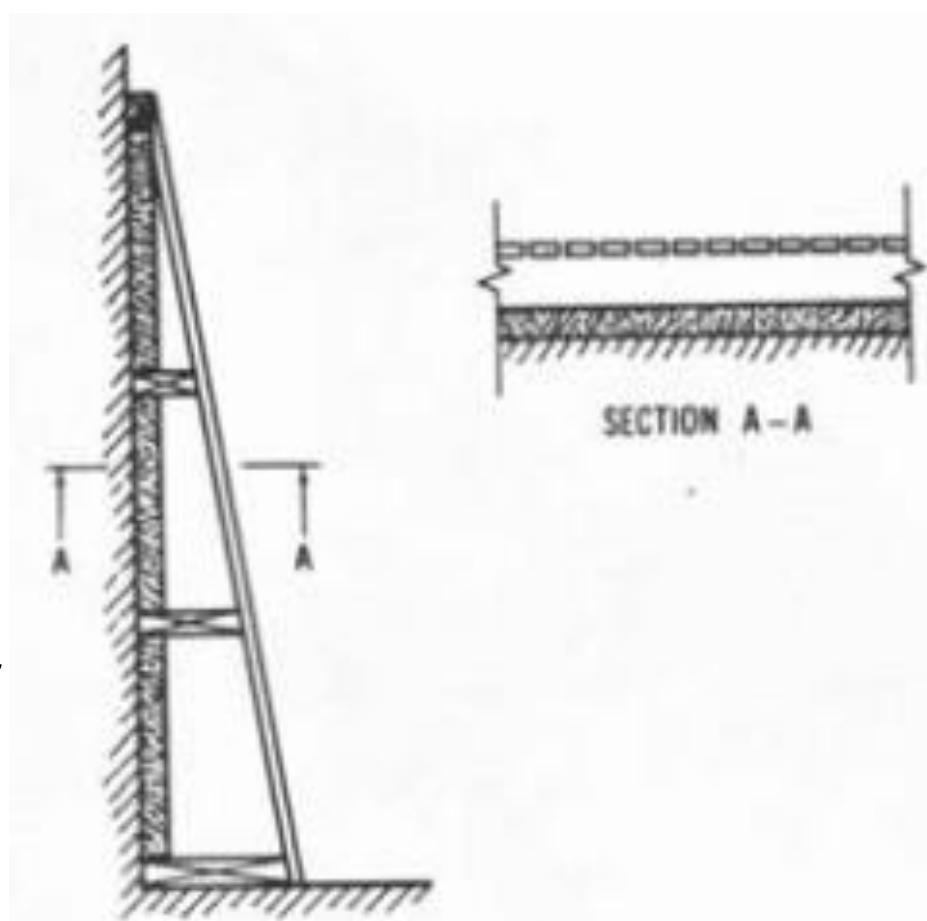


- **Multiresonadores**

- No son elementos dedicados a una sola frecuencia de resonancia. Pueden sintonizarse a varias frecuencias discretas (utilizando varios diámetros de perforación) o dentro de un margen frecuencial más o menos amplio (utilizando volúmenes variables).

- **Slat type**

- El slat type es un ejemplo de multiresonador basado en un panel perforado, generalmente lineal, que se coloca inclinado frente a la pared con la que forma la cavidad. De esta forma se crea una variable, la distancia d del panel a la pared y, por lo tanto, una frecuencia de resonancia variable entre la d_{\max} y la d_{\min} .



- **Ejemplos de Multiresonadores**

Los multiresonadores lineales del Pilarmonie de Berlin:



Multiresonadores con perforaciones de diámetros variables:



■ Otros elementos absorbentes

- **Absorción generada por las personas y las sillas**
 - Elementos muy importantes en acústica arquitectónica porque muy absorbentes ( efecto “seat dip”)
 - Siempre se expresan en “Absorción Sabine” **A** (en m²)

$$A_{Total\ Personas} = N A_{persona} \quad \text{con } N \text{ el numero de personas}$$

- Difícil de evaluar la absorción generada por las personas

- **Público disperso**

- Cuando el público no está agrupado en una zona de audiencia (e.g., polideportivo) suele utilizarse la absorción por persona en Sabines. La absorción total se calcula multiplicando el número de personas por el valor de absorción de una persona, como se ve en la siguiente tabla:

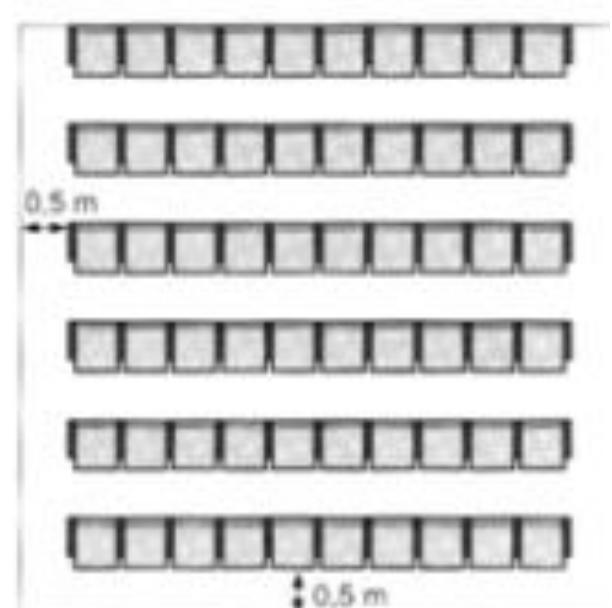
F (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
Persona parada con abrigo	0.17	0.41	0.91	1.30	1.43	1.47
Persona parada sin abrigo	0.12	0.24	0.59	0.98	1.13	1.12
Músico sentado con instrumento	0.60	0.95	1.06	1.08	1.08	1.08

Valores de absorción (en Sabines) calculados por Kath & Kuhl para el caso de “público disperso” (aclaración: datos por persona).

- **Público agrupado**

- Para el caso de público sentado en sillas se usan los coeficientes de absorción unitarios (energéticos). La absorción de la audiencia se calcula multiplicando su coeficiente asignado por el área ocupada. [Según Kosten y Beranek este procedimiento es válido cuando el asiento ocupa entre 0.45 y 0.79 m²]
- Se asignan coeficientes para el caso de sillas vacías o sillas ocupadas y se diferencian según el tapizado. La superficie contabilizada no es la superficie real ocupada por la audiencia sino la *superficie acústica efectiva* (S_A) que tiene en cuenta el **efecto contorno** y añade, en las bandas perimetrales libres, 50 cm de longitud.

$$A = S_A \alpha$$



Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

4. La absorción acústica

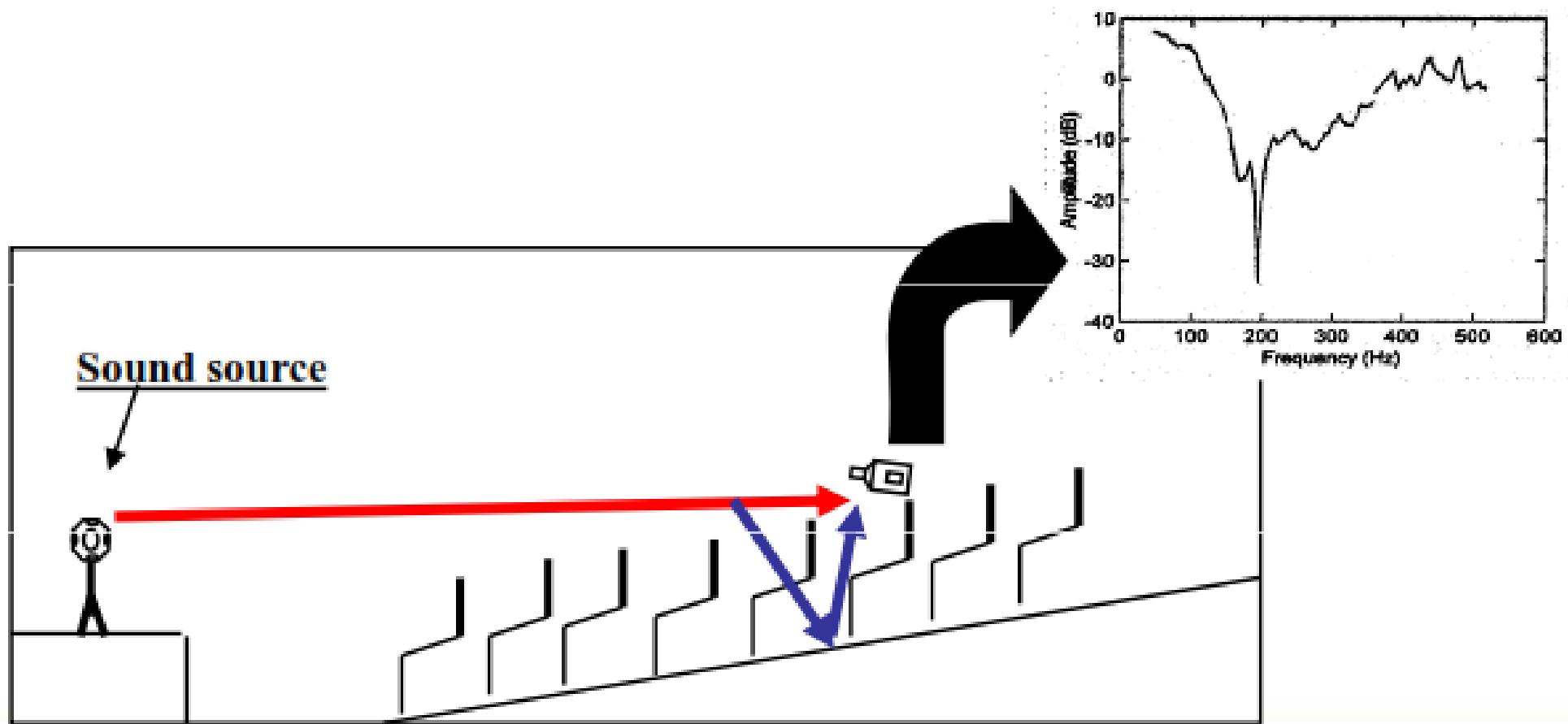
	F (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
Beranek - 1996	Asiento ocupado – tapizado grueso	0.76	0.83	0.88	0.91	0.91	0.89
	Asiento ocupado – tapizado medio	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86
	Asiento ocupado – tapizado fino	0.56	0.68	0.79	0.83	0.86	0.86
	Asiento vacío – tapizado grueso	0.72	0.79	0.83	0.84	0.83	0.79
	Asiento vacío – tapizado medio	0.56	0.64	0.70	0.72	0.68	0.62
	Asiento vacío – tapizado fino	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55
Barron - 1998	Asiento vacío – tapizado	0.32	0.50	0.73	0.87	0.85	
Arau - 1999	Asiento ocupado – tapizado grueso	0.52	0.68	0.85	0.97	0.93	0.85
	Asiento vacío – tapizado grueso	0.49	0.66	0.80	0.88	0.82	0.70

- **Efectos de difracción asociados a la audiencia**

- La audiencia puede tratarse como un material absorbente, pero al no ser una superficie plana, si no un elemento tridimensional que presenta cavidades, provoca, a la vez, efectos de difracción acústica.
 - Uno de estos efectos es la *sombra acústica*. Existe una pérdida energética por difracción. De este modo, las primeras filas “roban” energía a las filas más alejadas, aunque éstas tengan visión directa con la fuente. Este efecto se minimiza aumentando el ángulo de incidencia fuente-receptor, es decir: aumentando la altura de la fuente o inclinando la superficie de la audiencia.
-
- **Efecto seat-dip**
- *Seat-dip* es la atenuación selectiva experimentada por el sonido cuando se propaga por encima del área altamente absorbente ocupada por las sillas (con o sin público) y el ángulo de incidencia es pequeño (incidencia rasante).

- **Efecto seat-dip**

- Se caracteriza por una fuerte absorción de 10 a 20 dB a una frecuencia concreta en la banda comprendida entre 100 y 300 Hz.



- **Efecto seat-dip**

- Descubierto en 1962 cuando se hacía un estudio sobre la pobreza acústica de la New York Philharmonic Hall.
- Cuantificado en primer lugar por Sessler & West y por Schultz & Watters en 1964 cuando observaron que existía una importante atenuación del sonido, casi 20 dB, próxima a los 150 Hz.
- La causa primaria es la interferencia entre el sonido directo procedente del escenario y las múltiples reflexiones en el suelo y los asientos. Esta atenuación se pone de manifiesto cuando el sonido se ha propagado por encima de las primeras filas, y se mantiene constante con independencia del número de filas existentes en la sala. Se debe, por lo tanto, a la existencia de resonancias horizontales y verticales consecutivas producidas por los huecos entre fila y fila de asientos, que producen un efecto de cancelación por interferencia destructiva.
- Desde 1964 se hicieron más mediciones objetivas del fenómeno en salas de conciertos (Iida & Ando 1986; Bradley 1991) y en modelos a escala reducida (Ishida et al. 1989), dos modelos teóricos aparecieron en la literatura (Ando et al. 1982; Kawai & Terai 1991), se comprobó también que la atenuación variaba considerablemente de una sala a otra y de un tipo de asiento a otro.

- **Las butacas**

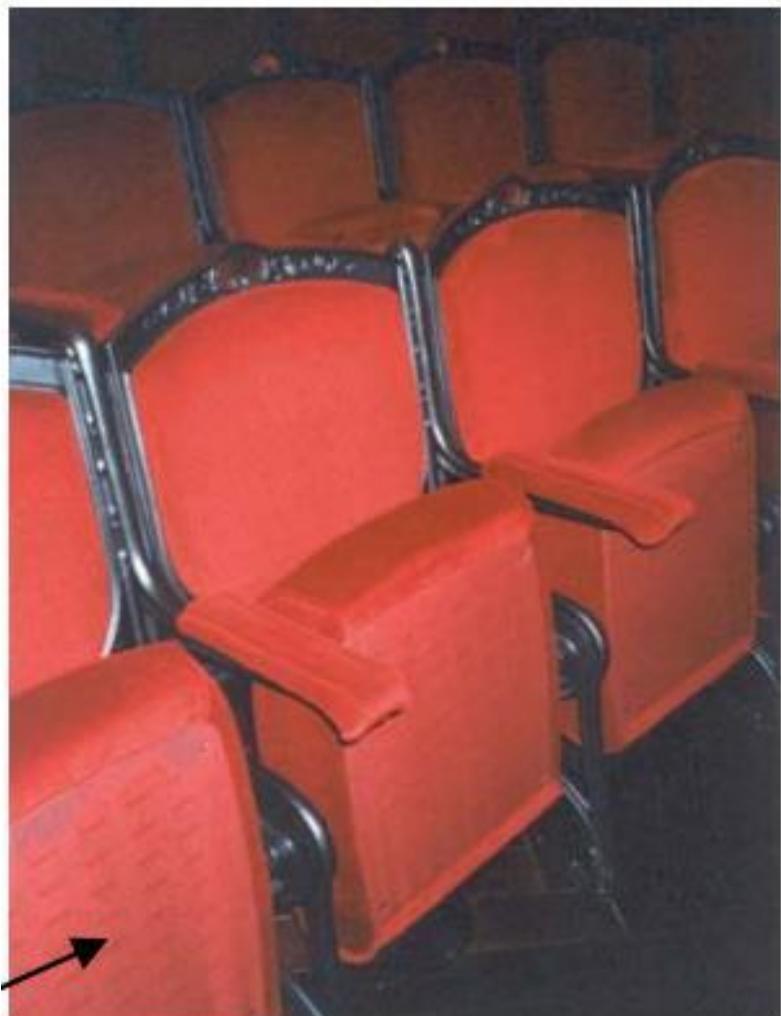
Las butacas, según su grado de tapizado, serán de gran importancia para determinar la absorción de la sala y la diferencia entre sala vacía y llena. Es importante que la sala no tenga variaciones significativas de absorción, cuando no esté al 100%, en cuanto a valor de absorción y a respuesta frecuencial.

Tres tipos de butacas con tres niveles de tapizado:



4. La absorción acústica

Fotografía de las butacas del Liceu de Barcelona con resonador lineal en la parte inferior (tapado con una tela)

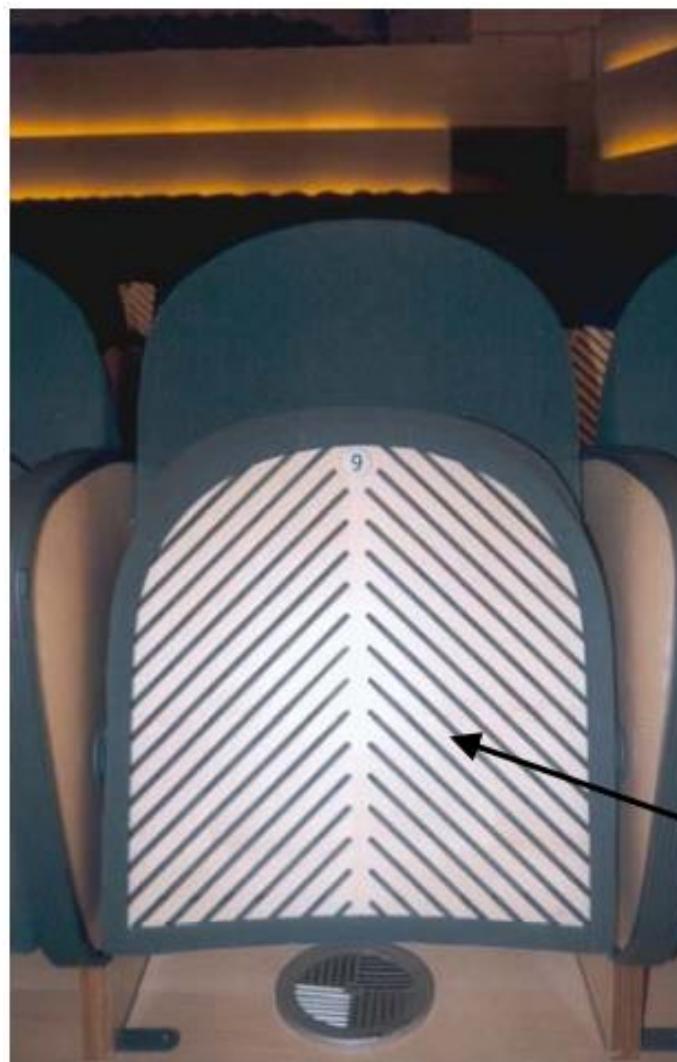


Resonador de panel ranurada con máxima absorción a 1 kHz. La butaca desocupada presenta una curva de absorción similar a la de una persona sentada

Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

4. La absorción acústica

Butacas de l'Auditori de Barcelona, con resonador lineal en la parte inferior, sintonizado a 1 kHz



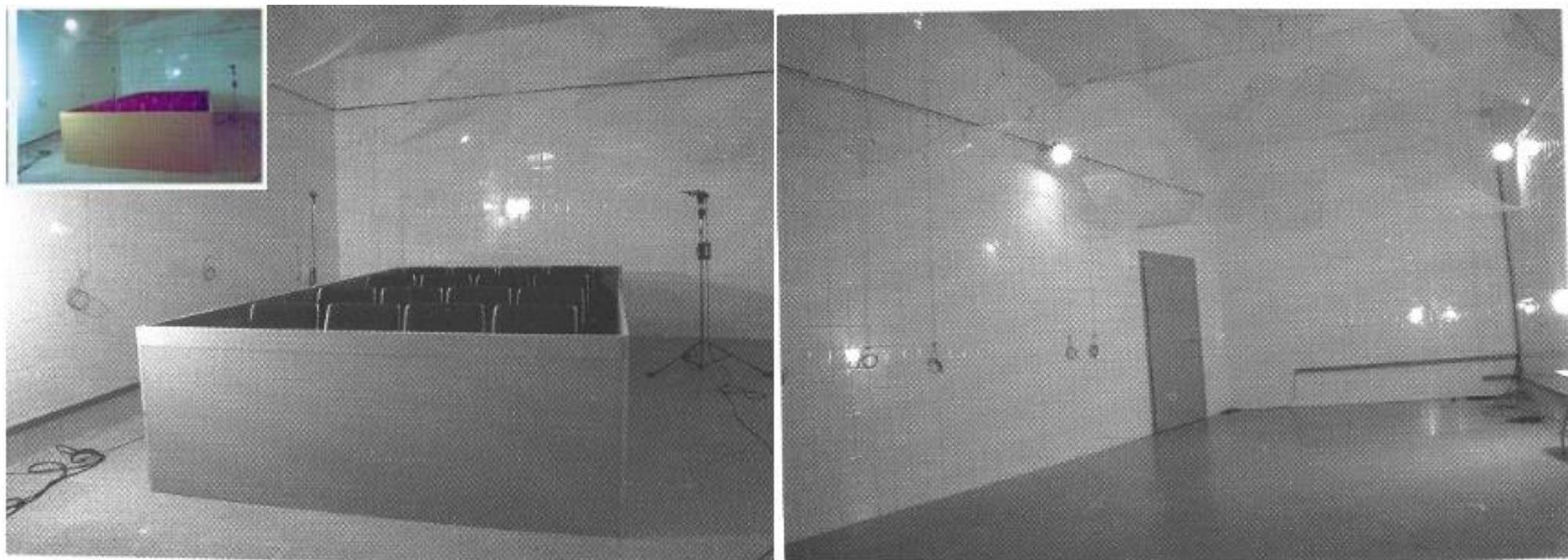
Resonador
lineal en forma
de espina

• Absorción del público y los asientos

- En un teatro o en un auditorio la superficie ocupada por el público constituye el área de absorción más importante de la sala. Los valores del coeficiente de absorción de la audiencia son conocidos pero su variabilidad es tan elevada que constituyen uno de los principales interrogantes en los cálculos de predicción acústica. No sólo es difícil poder cuantificar la absorción si no que deberían tenerse en cuenta otros fenómenos como la difracción, el efecto contorno, la influencia de la distribución y disposición del público, el tipo de butacas, el efecto seat-dip, etc. Todos estos factores provocan desviaciones en las simulaciones teóricas respecto el comportamiento real.
- La absorción producida por el público, se debe principalmente al tipo de ropa utilizada y a su grado de porosidad. Esta variabilidad obliga a trabajar con valores promediados, y es uno de los motivos de falta de precisión en los cálculos teóricos. Según la distribución del público, se cuantificará la absorción de formas distintas:
 - Cuantificación por “objetos” (público disperso)
 - Cuantificación por superficie (público agrupado)

- **Medida de la absorción de butacas en cámara reverberante**

- Los laterales de las butacas están cubiertos por unas maderas reflectantes. De esta forma se evita el efecto de absorción lateral. Después se contabilizará este efecto a partir de la superficie acústica efectiva (aumentando la superficie real 50 cm por lado libre).

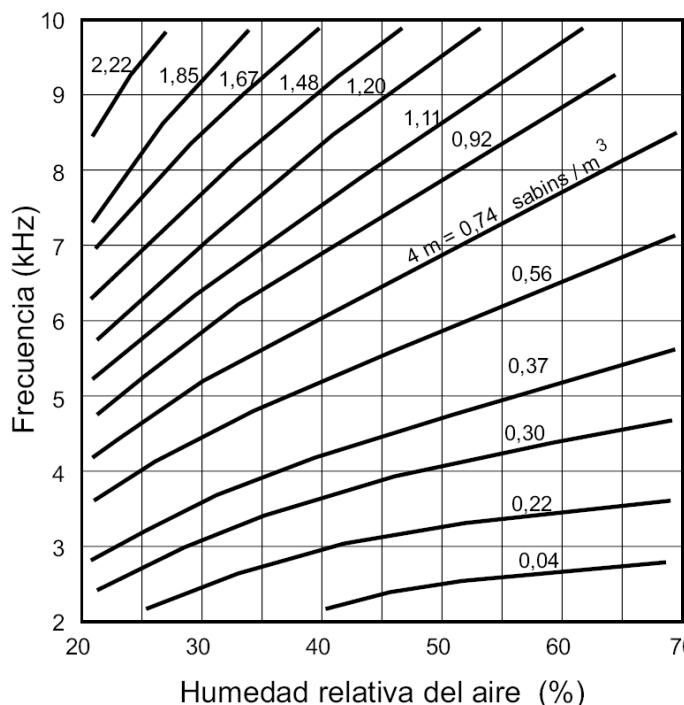


- Absorción del aire

- En el caso de los recintos grande la absorción del aire tiene que estar tomada en cuenta.
- Se define por la relación

$$m_b = 2m = \frac{[1 - (T - 20^\circ)0,04]17 \cdot 10^{-9} f^2}{\%_{humedad}} \quad ISO 9613$$

- O se utilizan curvas de referencias ($T = 20^\circ C$)



- El Tiempo de Reverberación considerando la absorción del aire se expresa en la formulación de Sabine por

$$T_R = \frac{0,161 V}{A_{Tot} + 4mV}$$

con $A_{Tot} = \sum_i \alpha_i S_i + A_{Total\ Personas} + A_{Sillas}$



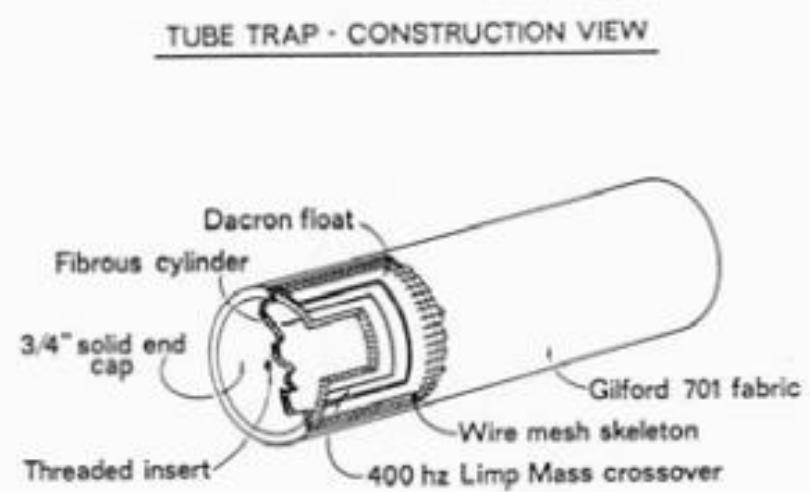
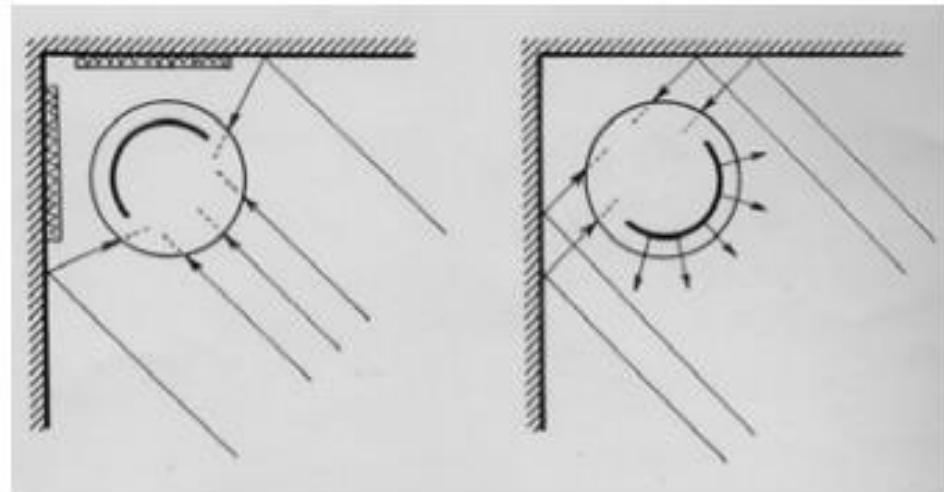
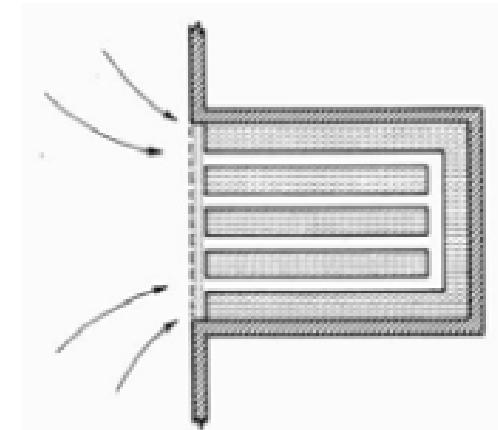
- **El Bass Trap**
 - Nombre genérico dado a un sistema absorbente (por resonador de Helmholtz o por materiales absorbentes) sintonizado en bajas frecuencias:
 \Rightarrow Máximos de presión en las esquinas y a la distancia asociada a un $\lambda/4$

• Bass Traps

Son elementos que intentan “atrapar” la onda sonora entre sus cavidades recubiertas de material absorbente. Son diseños poco teóricos, intuitivos y muy empíricos.

La **$\lambda/4$ trap** requiere de mucho espacio si se pretende usar para bajas frecuencias. Se basa en crear caminos recubiertos de absorbente y de longitud $\lambda/4$, para optimizar la absorción y cancelación de las ondas por distancia recorrida.

La **Tube trap** es un cilindro que suele colocarse en esquinas, con una parte reflectante y relleno de absorbente.



■ Variación de sonoridad y reducción de T_R

% de reducción de T_R	Reducción del NPS (dBA)	Cambio aparente en Sonoridad
20	1	Imperceptible
50	3	Levemente perceptible
75	6	Reducción claramente perceptible
90	10	Sensación de la mitad de fuerza
99	20	Sensación que el nivel fue reducido por cuatro

- Aportar absorción acústica para reducir el NPS no es la solución la más adecuada (y la más económica).

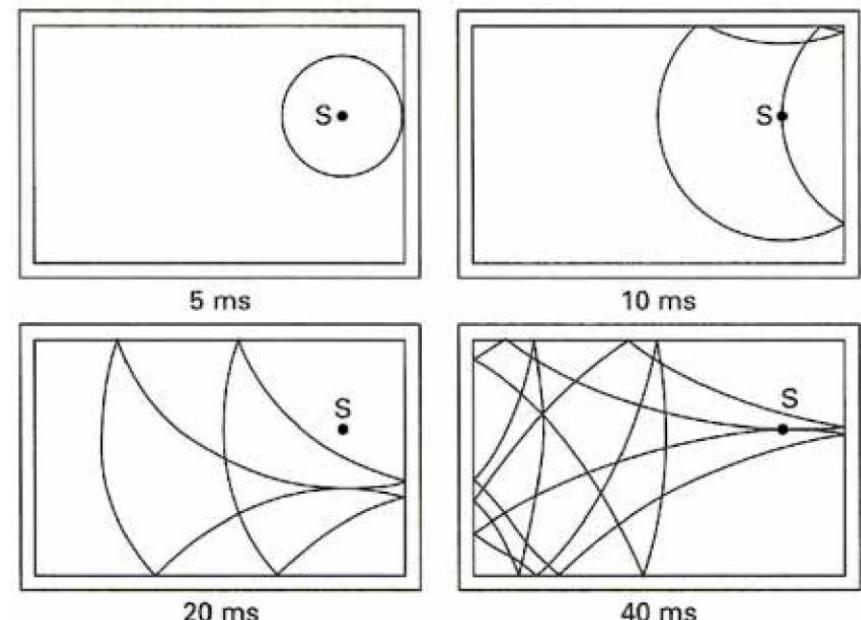
1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

■ Principio de la acústica geométrica

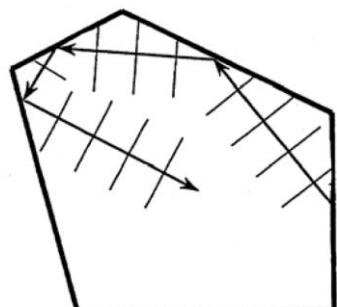
- Propagación de una onda omnidireccional en un recinto de tamaño:

$10,2m \times 6,8m \times z$

⇒ Rápidamente frente de onda puede ser considerado como plano!

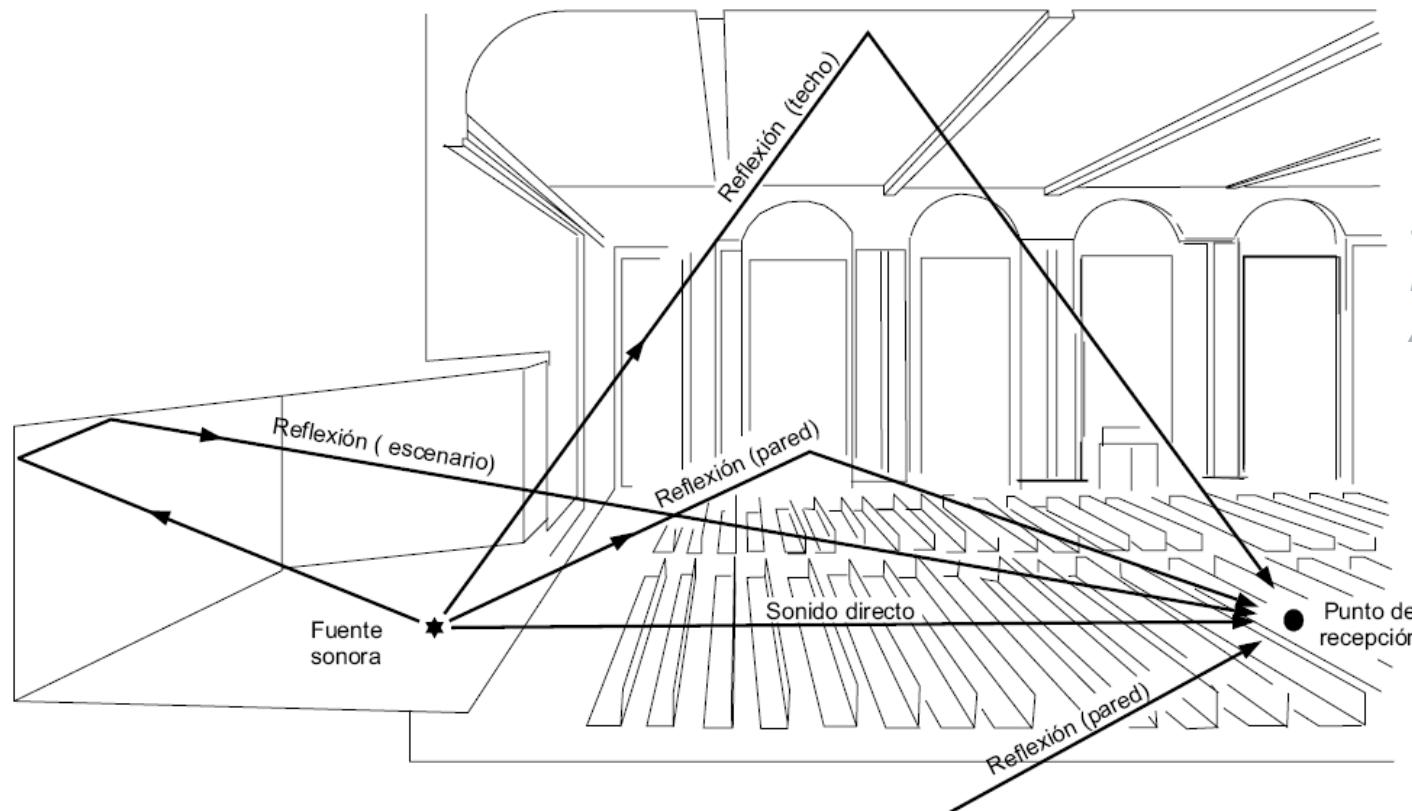


- Se considerara (suficientemente lejos de la fuente) que la fuente genera ondas planas en el espacio:
 - ⇒ Fuente = “generador” de rayos (perpendiculares al frente de onda) cuyas propagaciones pueden ser fácilmente seguidas



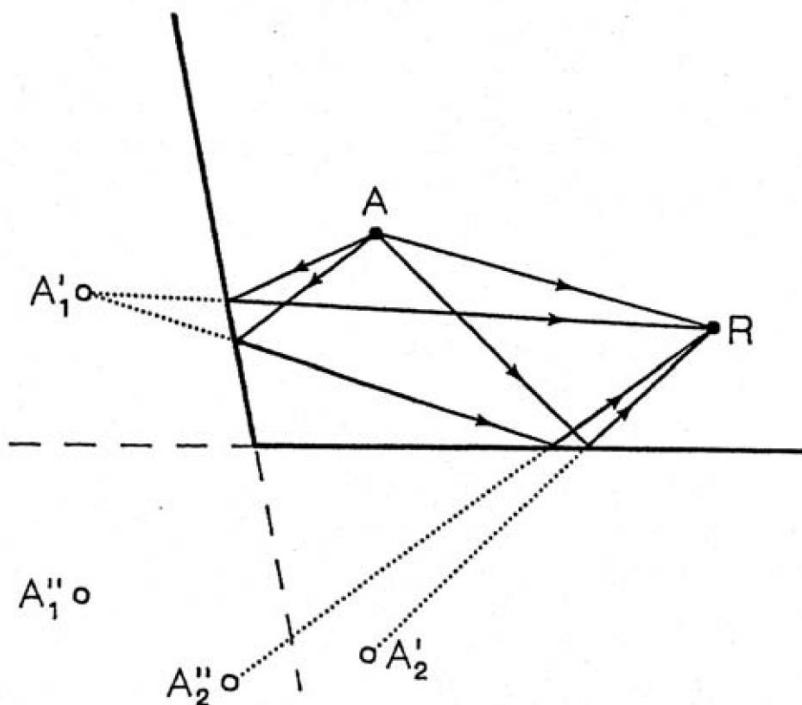
- **Método de los rayos**

- El sonido se considera como una onda plana propagándose perdiendo un poco de su energía cada vez que ella encuentra una pared (reflexión sigue ley de Snell-Descartes).
- Fase y longitud de onda no están considerados en este enfoque, solo se considera la dirección de propagación.



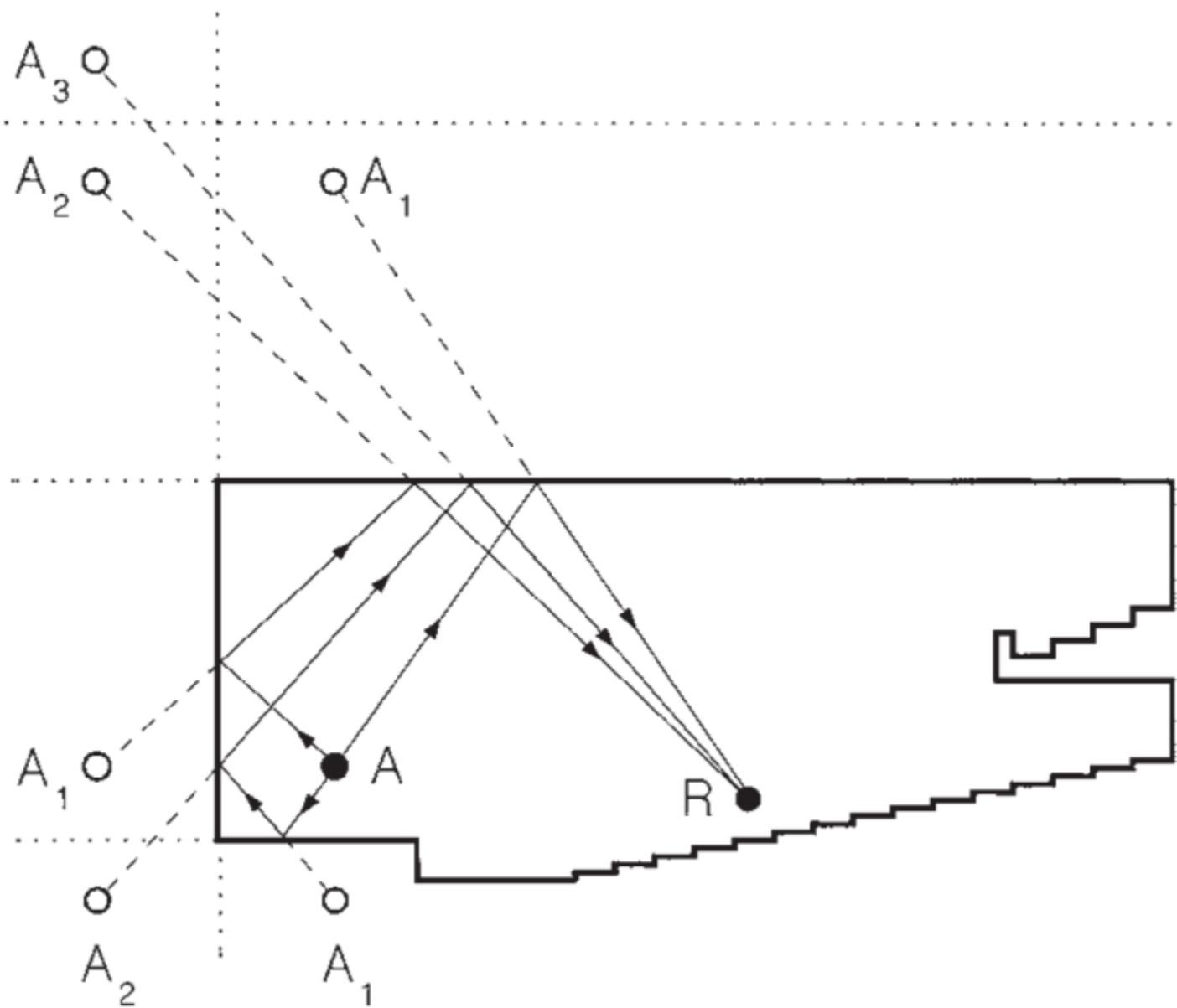
- Método de las fuentes virtuales

- Las reflexiones pueden ser vistas como un sonido que proviene de una fuente virtual.
- Las distintas fuentes virtuales presentan un nivel energético decreciente en función del grado de reflexión y de absorción.

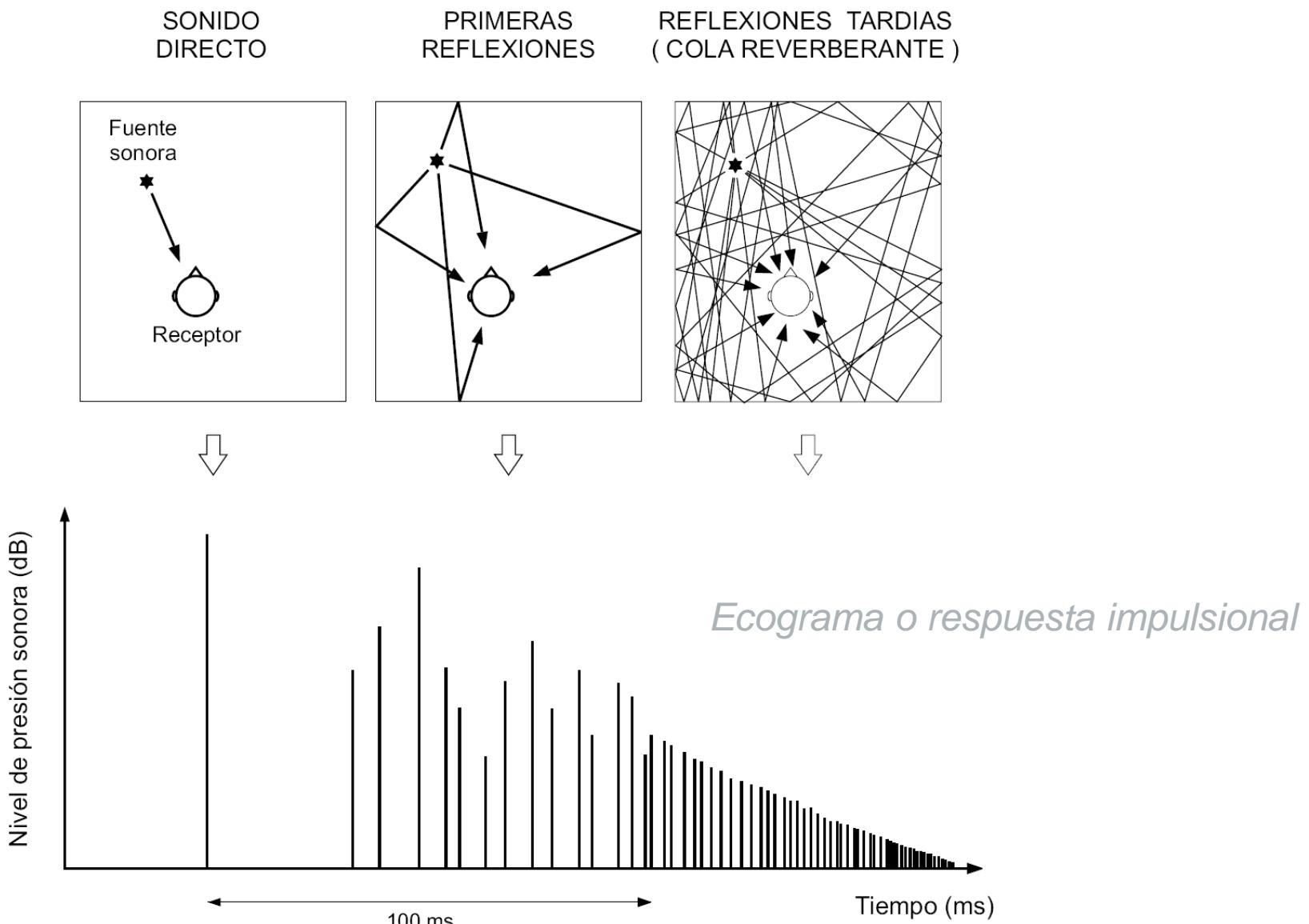


Método de las fuentes virtuales

- Ilustración del método de las fuentes virtuales según **Kuttruff**

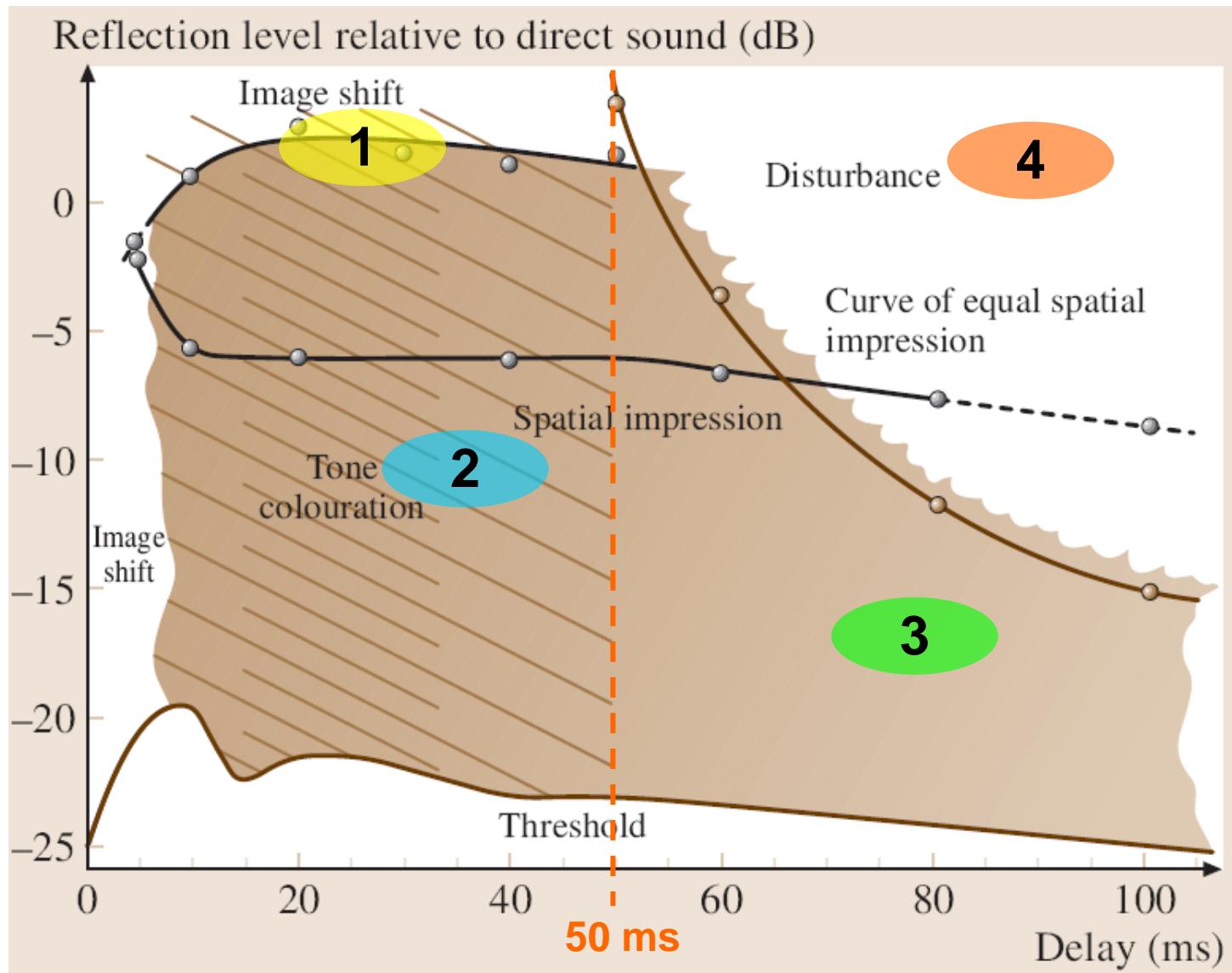


- Beneficios e inconvenientes de las reflexiones



- Efecto de una reflexión simple según **Barron**:

0dB = reflexión de misma amplitud que el sonido directo



1 Desplazamiento de la localización de la fuente

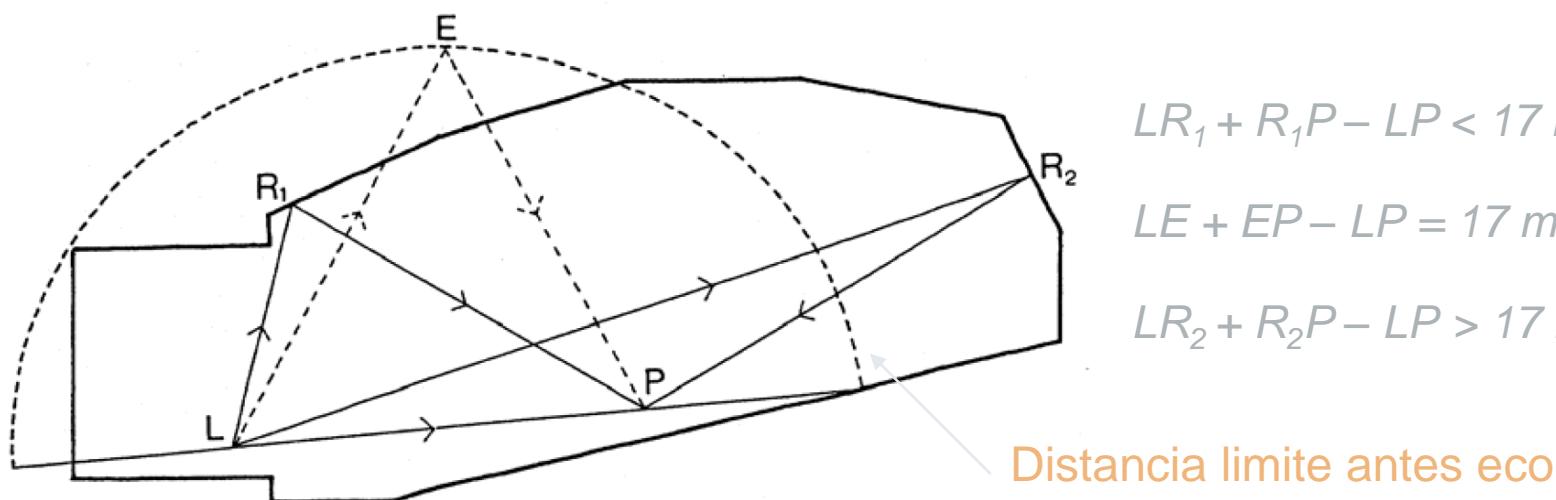
2 Aumento de la inteligibilidad
coloración del sonido!

3 No pasa nada

4 Aparición de ecos

5. El acondicionamiento acústico de recintos

- El **fenómeno de eco**: corresponde a una reflexión claramente audible. Sonido que se puede diferenciar del sonido directo.
⇒ La reflexión llega con un atraso **> 50 ms** (diferencia de camino de aproximadamente 17 m)



$LR_1 + R_1P - LP < 17 \text{ m} \Rightarrow \text{OK}$

$LE + EP - LP = 17 \text{ m} \Rightarrow \text{límite}$

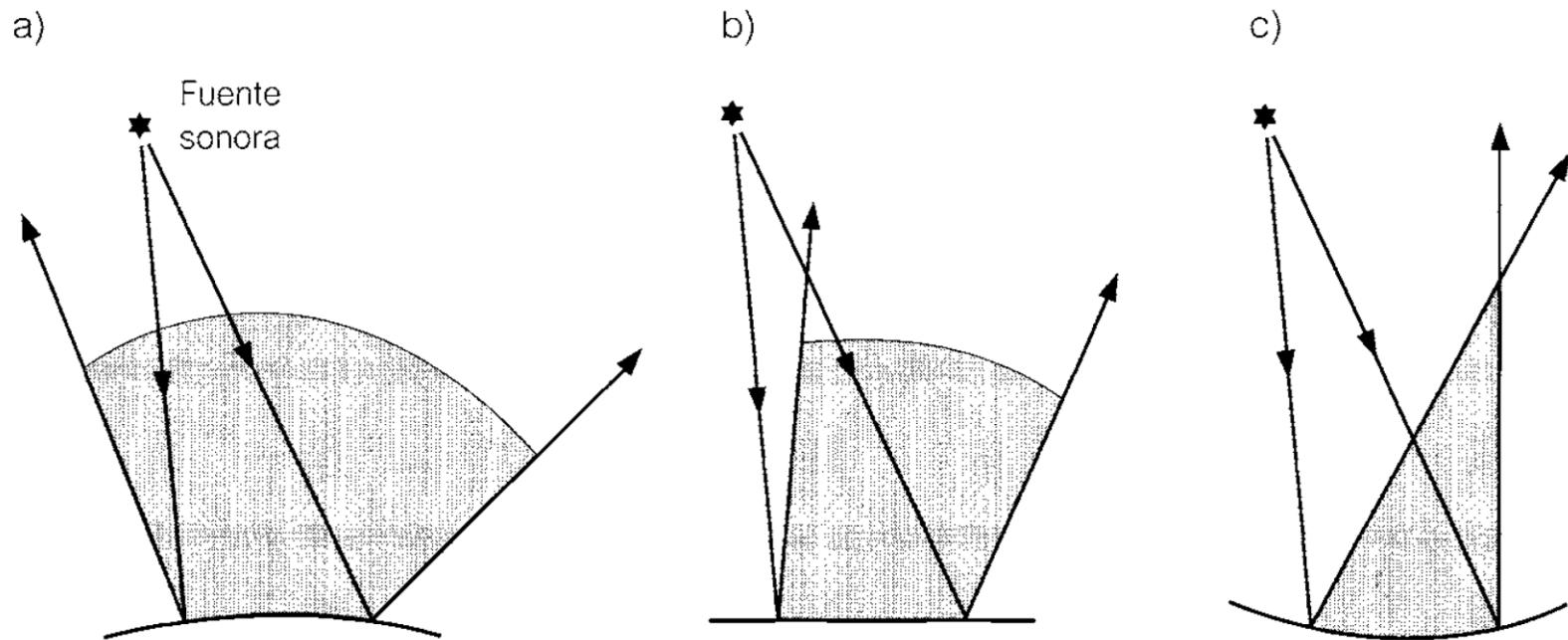
$LR_2 + R_2P - LP > 17 \text{ m} \Rightarrow \text{ECO}$

El eco depende de la diferencia de nivel entre la onda reflejada y la onda incidente

- El **eco flotante (“flutter echo”)**: repetición múltiple en un tiempo corto de un sonido cuando una fuente se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes.

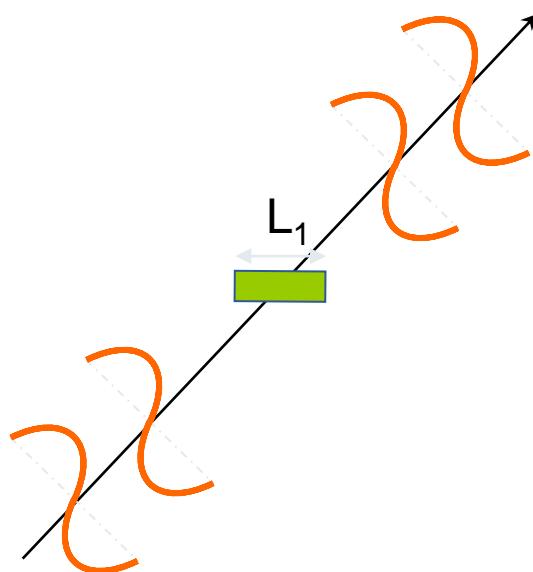
• Los reflectores

- Posibilitar la aparición de reflexiones útiles ($t < 50$ ms para el habla y $t < 80$ ms para la música)
- Hechos de materiales lisos, rígidos, generalmente poco porosos para poder reflejar una mayor parte de la energía
- De superficies planas^(b) o curvas (convexas^(a), cóncavas^(c))

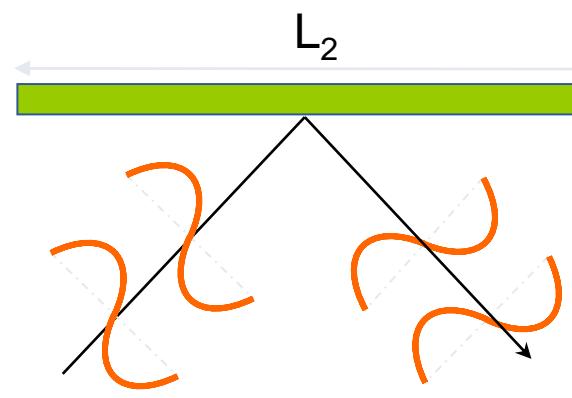


Zonas de cobertura asociadas a diferentes superficies

- El tamaño del reflector depende de la longitud de la onda sobre la cual tiene que actuar.
- La onda será o difractada o reflejada:



$L_1 < \lambda/2 \Rightarrow$ onda difractada



$L_2 > \lambda/2 \Rightarrow$ onda reflejada

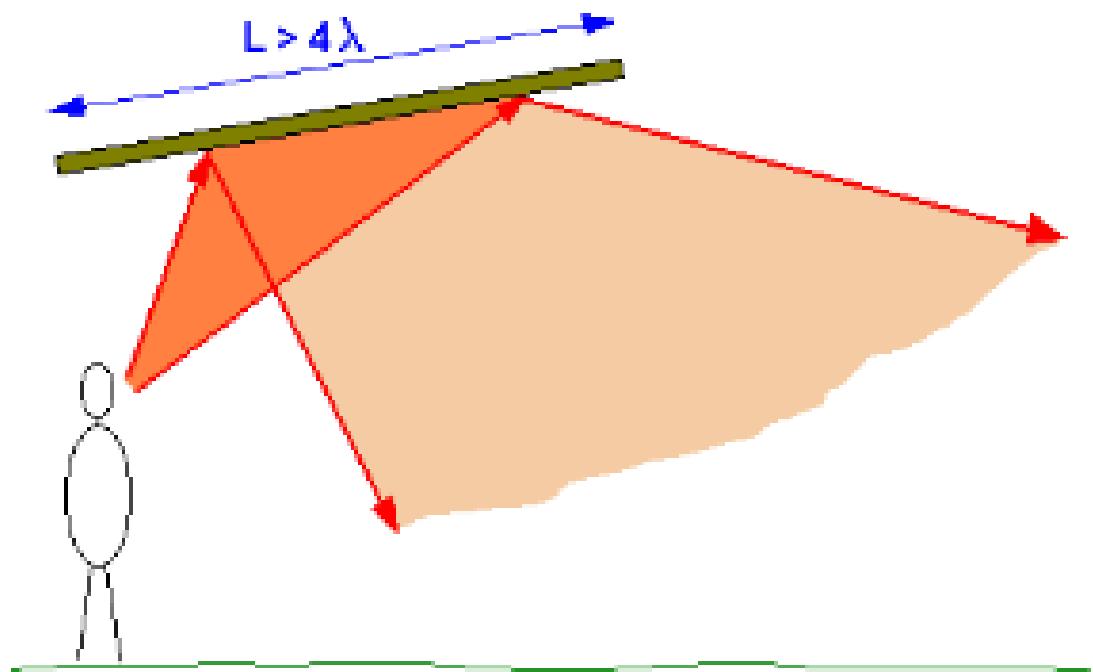
<http://www.falstad.com/wave2d/>

- **Reflexiones útiles**

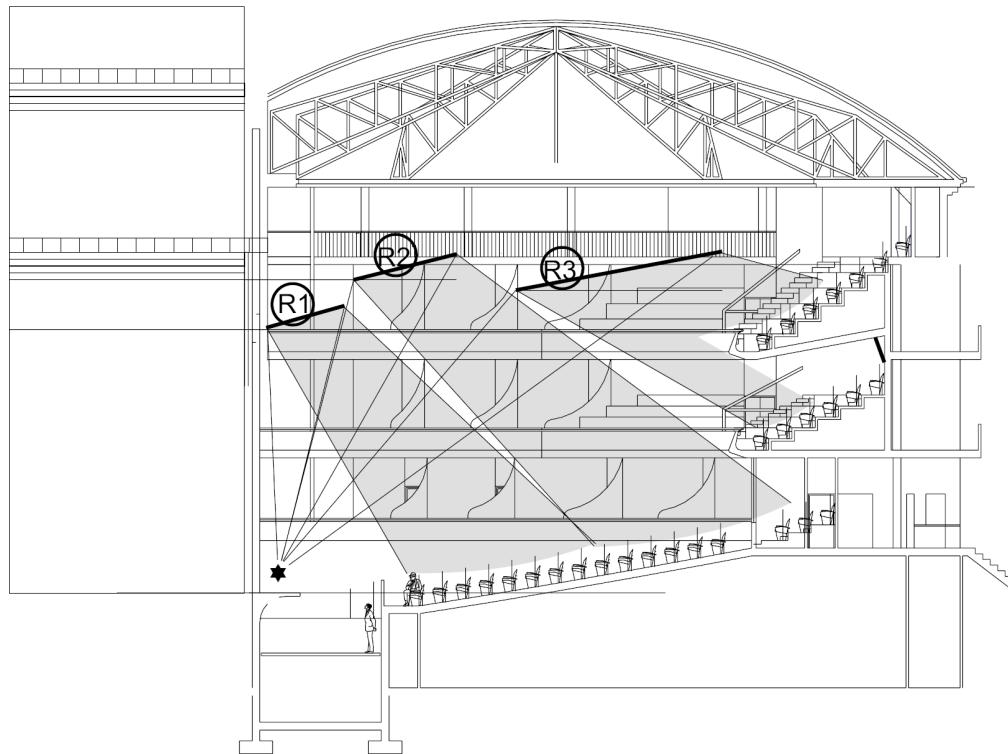
- **Salas para voz:** reflexiones antes de los primeros 50 ms. El límite de integración del oído humano (antes de detectar eco) es de 50 ms. Estas reflexiones se denominan reflexiones tempranas.
- **Salas para música:** reflexiones de los primeros 80 ms. En este caso la inteligibilidad no es primordial y si la reverberación y la sonoridad.

- **Cuándo una superficie actuará como reflector acústico?**

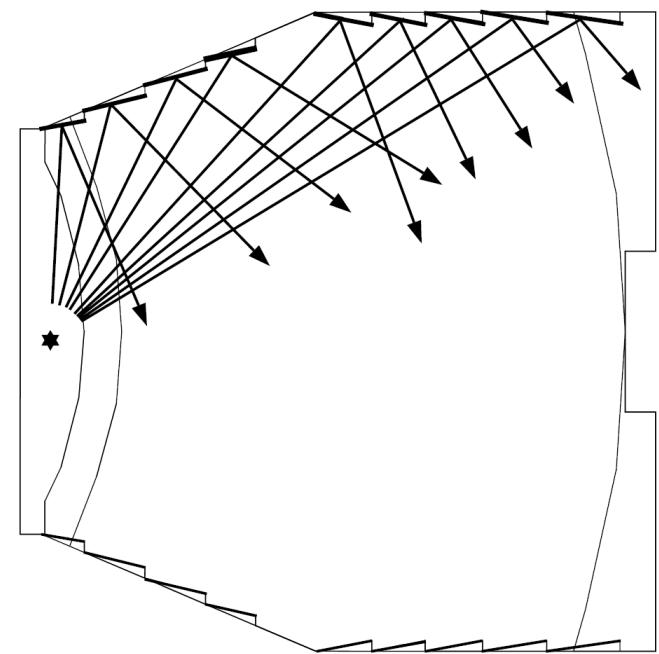
Cuando la superficie reflectora es lisa y tiene unas dimensiones grandes (de 3 a 4 veces) comparadas con la longitud de onda del sonido considerado. Todas las frecuencias que tengan una longitud de onda comparables o menores a las del receptor, sufrirán el efecto de la difracción: la onda envolverá el reflector sin desviar su trayectoria. Se puede encontrar reflectores planos y curvos. Estos últimos pueden provocar problemas de focalización.



- Ejemplos de reflectores:



Ejemplo de reflectores de techo en un teatro



Ejemplo de reflectores laterales

- ⇒ Permiten aumentar la **sonoridad** y la **claridad musical**
- ⇒ Las reflexiones laterales permiten de aumentar el grado de **impresión espacial** en una sala

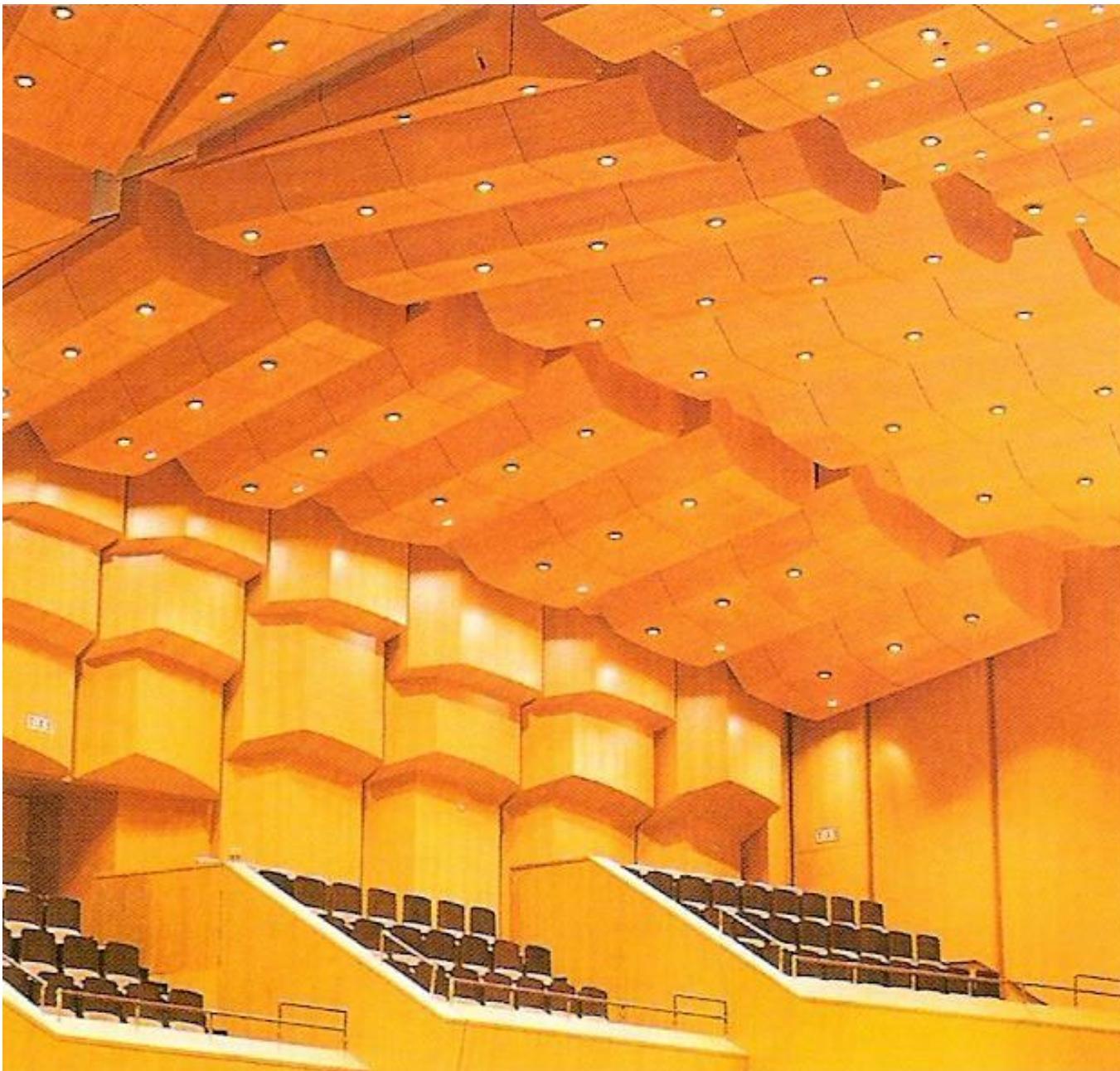
- **Algunos ejemplos de reflectores**



Aula Magna, Caracas

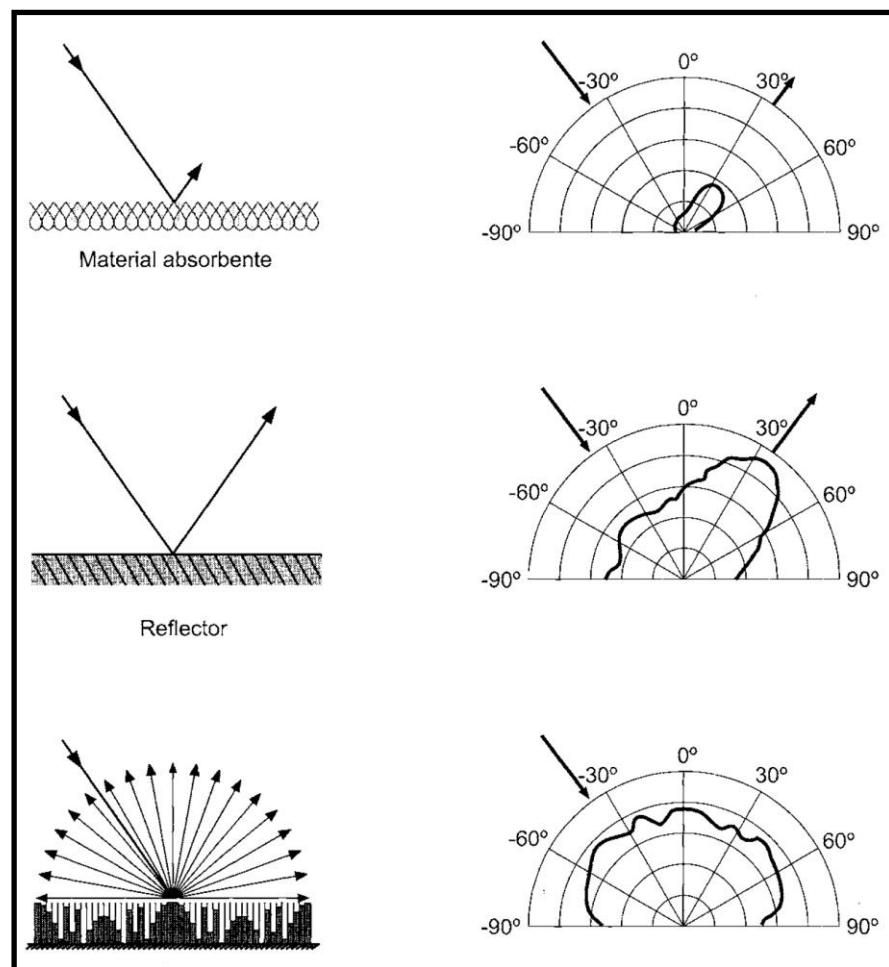
Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

5. El acondicionamiento acústico de recintos



• Los difusores

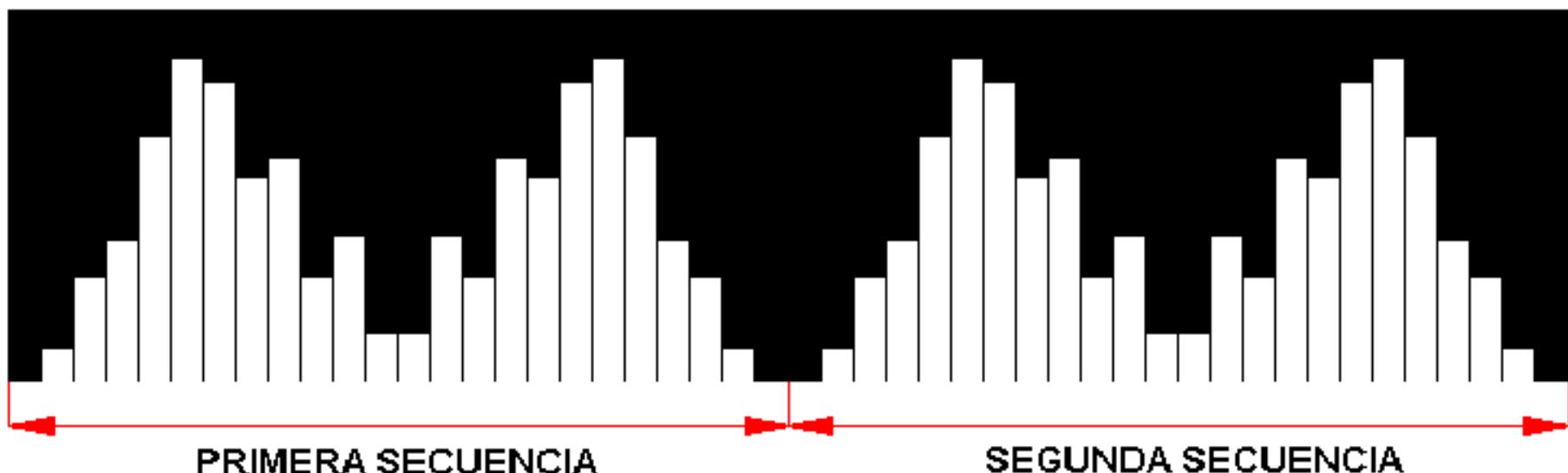
- Cuando una onda encuentra un obstáculo se producen fenómenos de difracción (según relación entre λ y tamaño obstáculo)
- Idea = homogeneizar la difusión
- Superficies irregulares, policilíndricos o difusores de Schroeder
- Principalmente 3 tipos de difusores de Schroeder:
 - MLS (“maximun Length Sequence”)
 - QRD / RPG (“Quadratic-Residue Diffusor”)
 - PRD (“Primitive-Root Diffusor”)



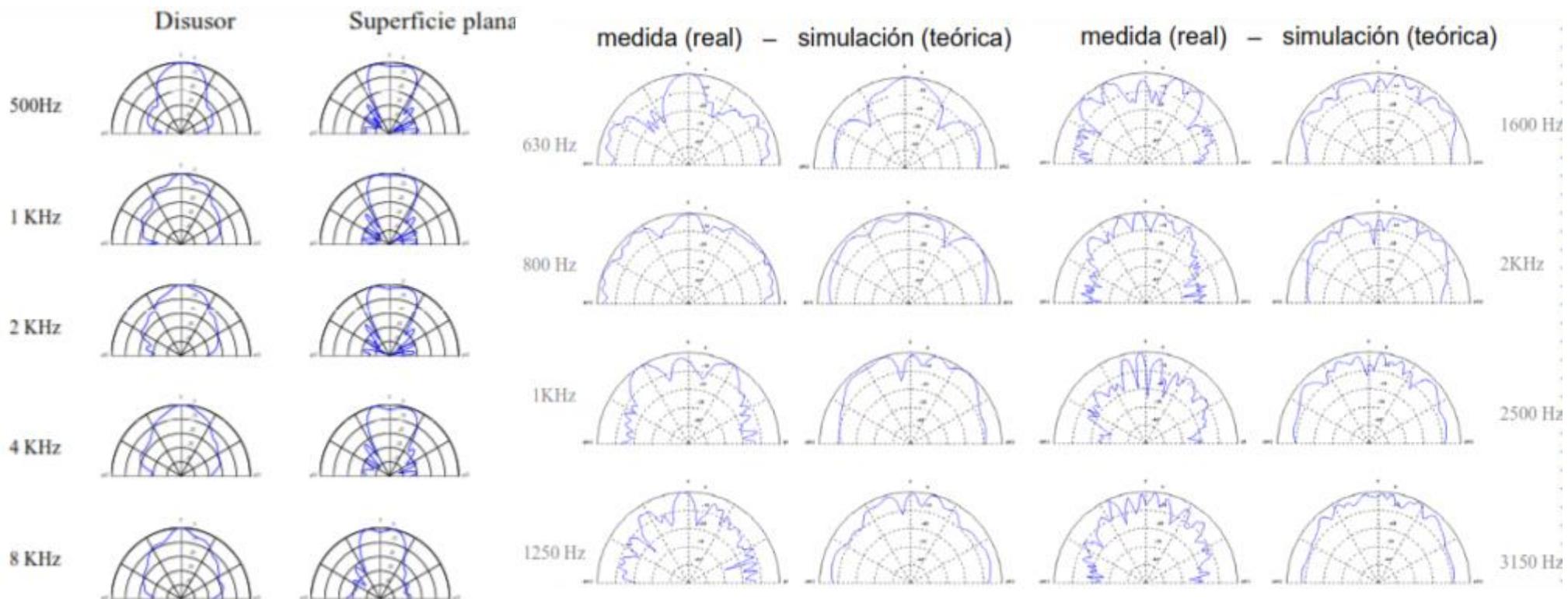
Patrones polares de un material absorbente, un reflector y un difusor

- Cualquier superficie que presente irregularidades, relieves o rugosidades, puede provocar difusión acústica, siempre y cuando estos relieves sean de dimensiones comparables a la longitud de onda.
- De este modo, los teatros antiguos llenos de esculturas y relieves, presentan una difusión muy bueno. Mientras que la arquitectura moderna, sumamente minimalista y de materiales lisos, no la favorece.
- Existen muchos tipos de superficies difusoras. Algunas de ellas se consiguen a base de crear estructuras con relieves o hendiduras que siguen un orden establecido por una secuencia matemática. Algunos de estos difusores fueron patentados desde hace ya algunas décadas, son los llamados RPG: Reflection Phase Grating.

- Un difusor RPG está formado por diversas hendiduras con distintas profundidades. Estas hendiduras o pozos son de una profundidad determinada por una secuencia matemática que se repite las veces que se requiera (según la superficie que deba tener el difusor) y deben estar separadas entre ellas por divisiones delgadas y rígidas. Existen diferentes procedimientos para generar la secuencia matemática que proporciona un repartimiento uniforme del sonido dando lugar a diferentes tipos de difusor: RP o QR



- Resultados obtenidos de la medida de la medida de la energía que rodea al difusor (con incidencia normal) y la energía que rodea una tabla de madera lisa, en el segundo caso.



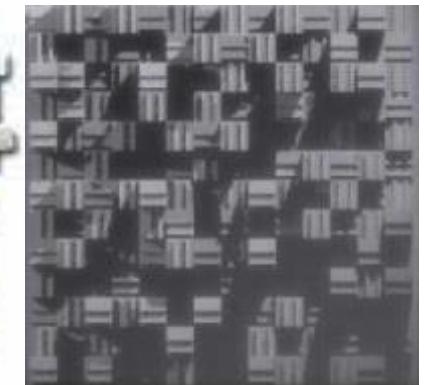
- Ejemplos de difusores



QRD 1D



QRD 2D



- Producen un poco de absorción (por efecto de resonador tipo $\frac{1}{4}$ de onda o por fricción viscosa en el caso de haber separadores entre celdas)
- Cuando la repartición es aleatoria:
⇒ efecto de absorción sobre una gama de frecuencias larga, puede ser mejorado si se cubre el difusor de una película resistiva

- Ejemplos de difusores



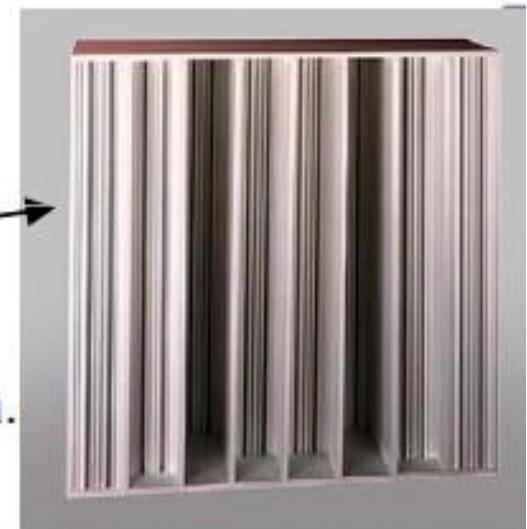
Difusor de madera



Difusor recubierto de absorbente
alta frecuencia (Abfusor)



Trifusor: Elementos móviles con
una cara absorbente, una difusora
y una reflectante

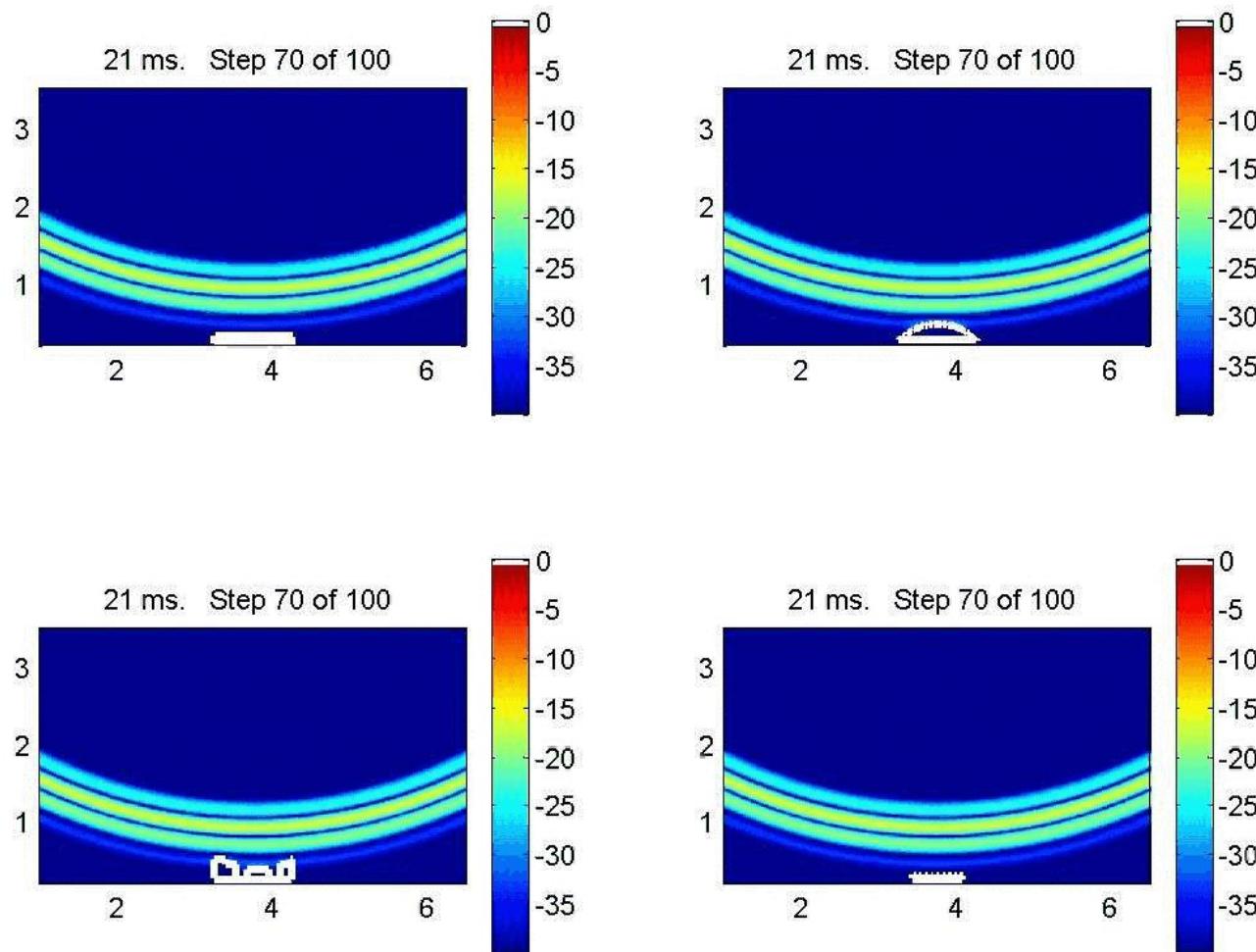


Difusor fractal:
El difusor de media frecuencia
incluye un difusor de alta frecuencia.

- Ejemplos de difusores

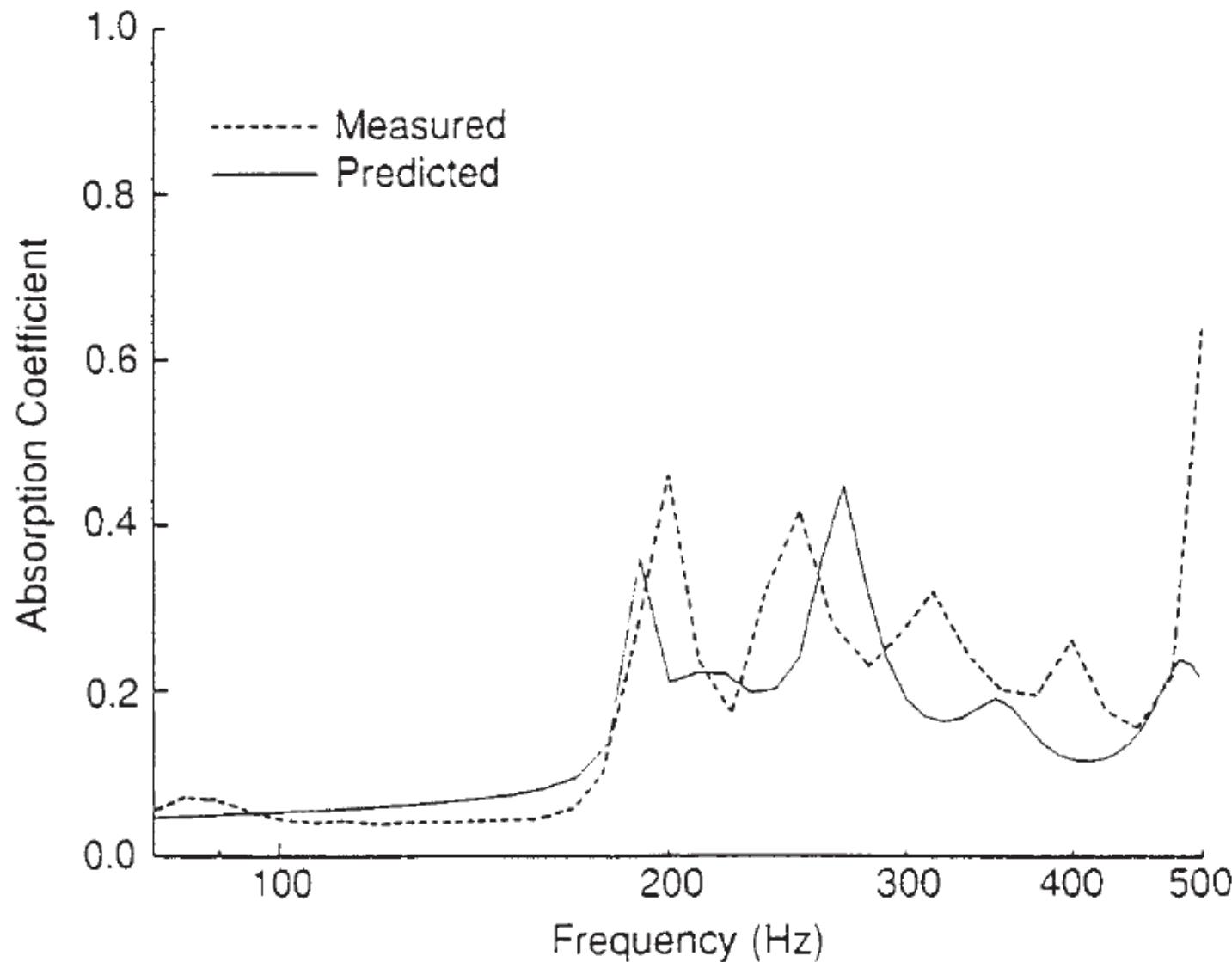


- Simulación de varios difusores



- Qué efectos puede provocar una superficie difusora?
 - A parte de la difusión del sonido, según el tipo de superficie, puede ser que se genere una absorción acústica importante. Para el caso de los difusores RPG, por ejemplo, las cavidades o pozos son generalmente de madera y huecos por dentro. Este tipo de construcción puede suponer un coeficiente de absorción significativo a frecuencias medias (depende del diseño y tipo de difusor). Siempre se debe tener en cuenta las características de absorción de estos elementos aunque no sean el objetivo de su uso, pues pueden causar problemas imprevistos.
 - En algunos casos, cuando existe un exceso de difusión, se priva la sala de reflexiones especulares útiles, rompiendo sobremanera la energía y provocando una falta energética de primeras reflexiones importantes.

- Ilustración de la absorción de un difusor QRD según **Fujiwara**



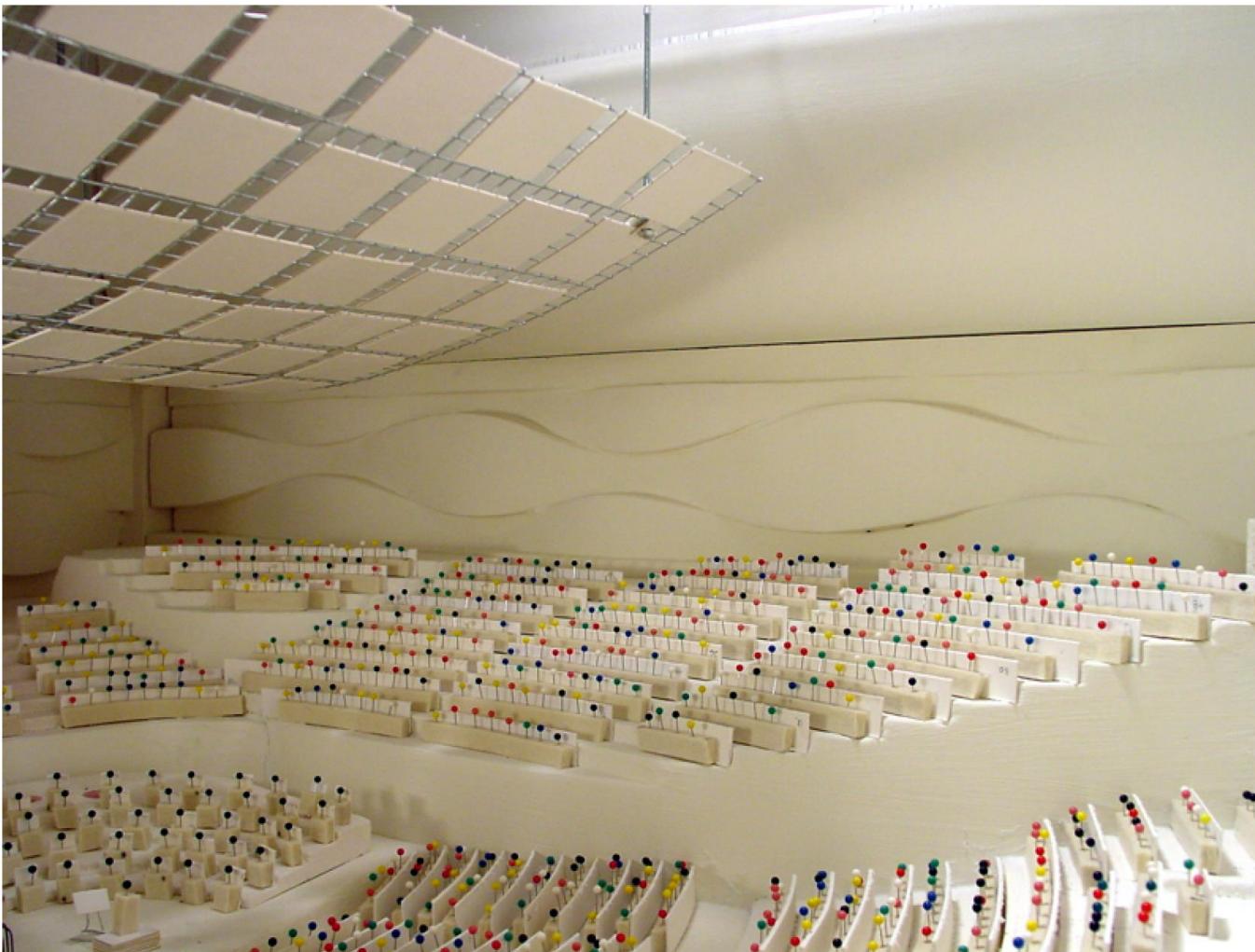
- Las maquetas
 - Principio de similitud, por un factor de escala 1:N

	Tamaño real	Tamaño maqueta
Longitud de onda	λ	λ/N
Frecuencia	f	$f.N$
tiempo	t	t/N

⇒ Maqueta al 1:20, frecuencia excitación de [400Hz-400kHz]

- Difícil de conseguir buenas fuentes, micrófonos adaptados y materiales con absorción equivalente
- Absorción por propagación considerable: se cambia el gas durante la medición o se corrigen los valores después de la medición

- Permite tener resultados muy precisos y conocer los efectos ligados a la difracción.



Ejemplo de maqueta del Atlanta Symphonic Hall

■ Acústica Variable

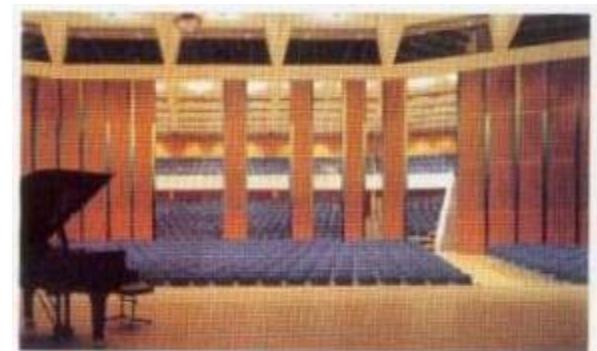
- El diseño de una sala de uso polivalente debe pensarse con técnicas de acústica variable para poder adecuar las condiciones o características de la sala a los diferentes requisitos.
- Los métodos utilizados para dotar a la sala de variabilidad de tratamiento acústico se agrupan en 2 tipos:
 - Métodos con elementos físicos variables
 - Métodos electrónicos
- Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes y ambos se destinan a variar el tiempo de reverberación inicial de la sala con diferentes niveles de actuación en función de las necesidades.

- Elementos físicos variables:
 - Los métodos físicos para la acústica variables pueden resumirse en términos generales en 3 formas de actuación:
 - Variación de volumen
 - Sillas móviles (absorción de la audiencia)
 - Variación de la absorción adicional
 - Actuando con cualquier de estas técnicas se consigue variar algún parámetro importante del tiempo de reverberación de la sala :

$$T = \frac{0,161V}{A_s + A_r}$$

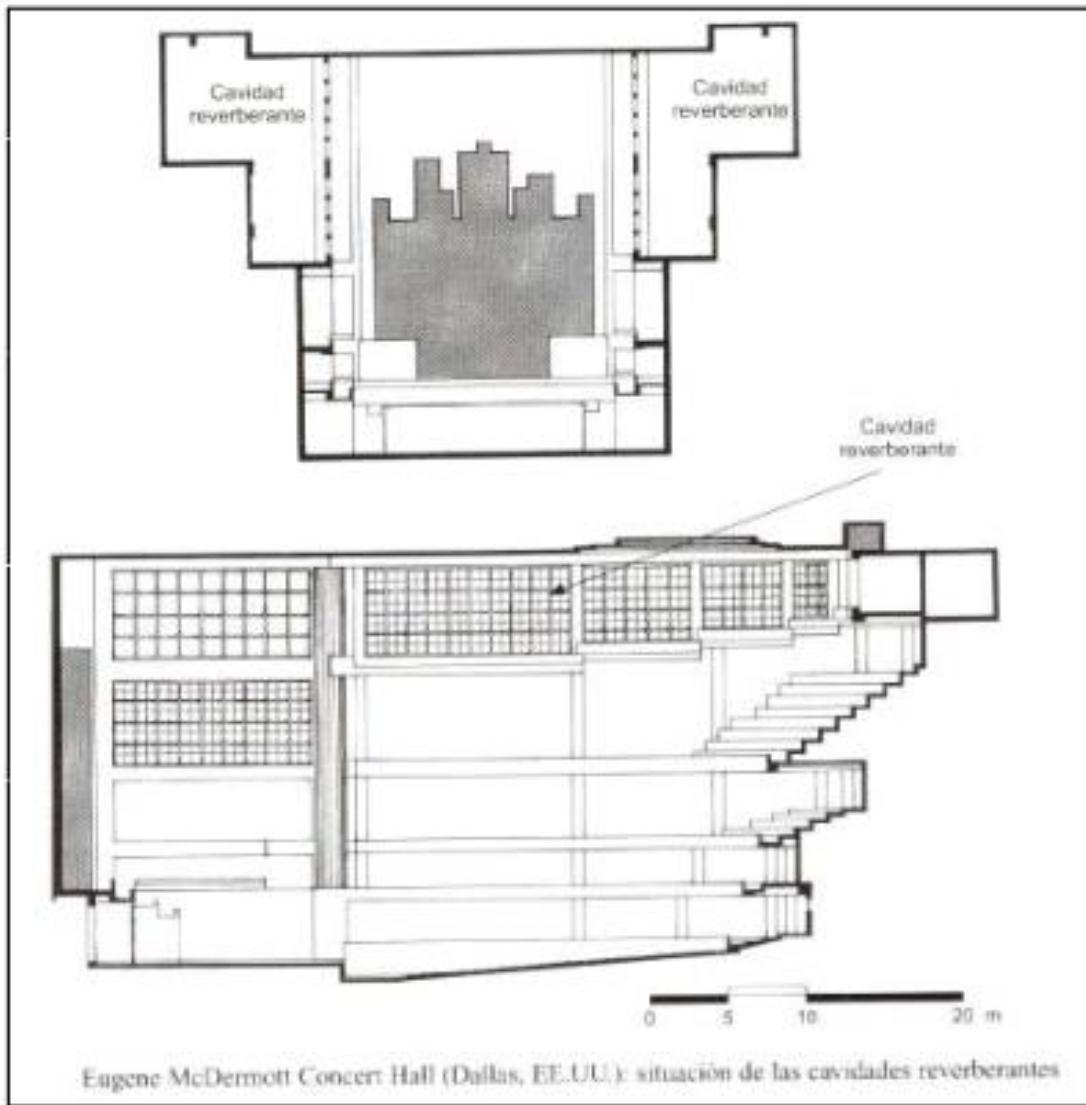
Donde A_s es la absorción de las sillas (audiencia) y A_r la restante o adicional

- **Variación del volumen**
 - *Partición o mampara móvil vertical*
 - Este sistema puede dividir el recinto en subespacios diferenciados e independientes con un RT inferior, cada uno (por la reducción de volumen) y con la posibilidad de destinar cada espacio a usos diferentes entre ellos.
 - Debe controlarse el aislamiento entre los subespacios creados, debe ser riguroso y, al ser una mampara, el objetivo es de difícil obtención.



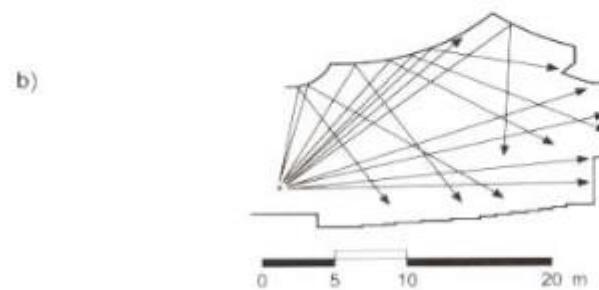
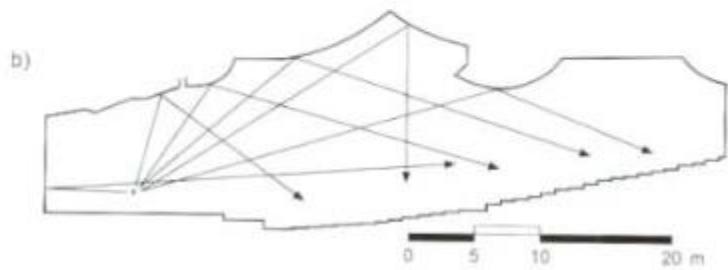
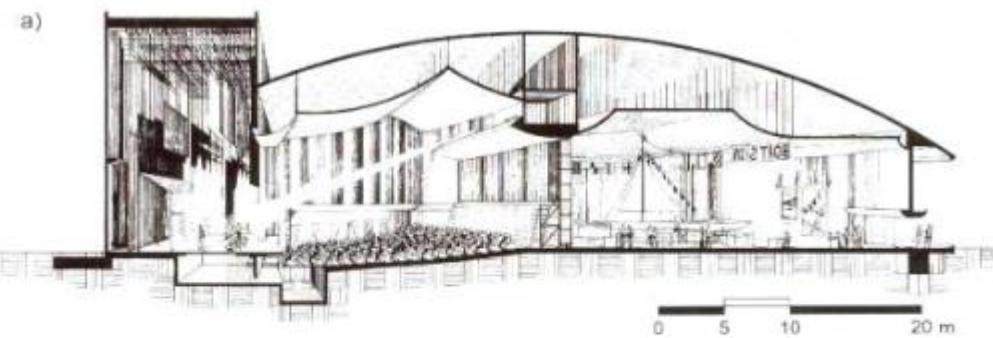
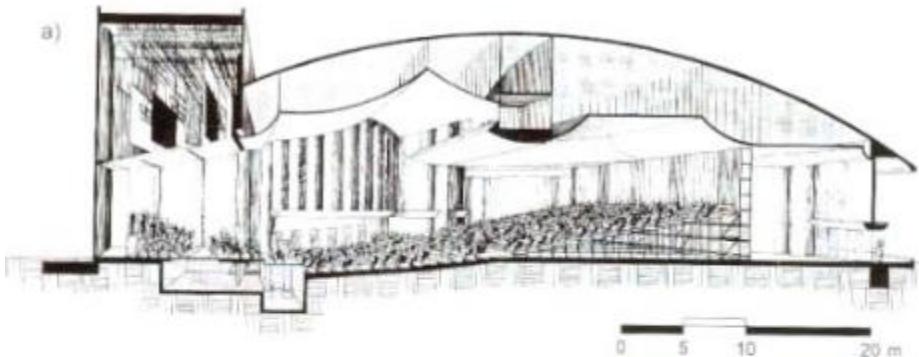
- *Sistema de cierre y apertura del falso techo*
 - Al abrir el falso techo se acopla el volumen encerrado entre el falso techo de la sala y el original. Para obtener una variabilidad acústica significativa, la variación de volumen debe ser superior al 40% y la parte acoplada debe ser muy reverberante. De todos modos, el RT no varía significativamente.
- *Cavidades reverberantes acopladas a la sala*
 - Se basa en el método anterior pero, en este caso, las cavidades acopladas son muy reverberantes y de dimensiones adecuadas pues han sido diseñadas especialmente para este propósito. El efecto acústico del acoplamiento provoca un alargamiento de la cola reverberante de la sala.

- *Cavidades reverberantes acopladas a la sala*



- **Paneles móviles suspendidos del techo**
 - Se trata de un sistema de paneles móviles que pueden incrementar el volumen la sala y reducirlo. A veces también tapan incluso zonas de audiencia. La aproximación de los paneles al público, con la inclinación adecuada, puede mejorar la calidad de las reflexiones muy significativamente. La variación no sólo cuenta con un cambio de volumen sino que puede mejorar los patrones de reflexiones adecuados para el nuevo uso.
 - El sistema es complejo y costoso. Provoca problemas relacionados con el sistema de iluminación y ventilación en la sala.

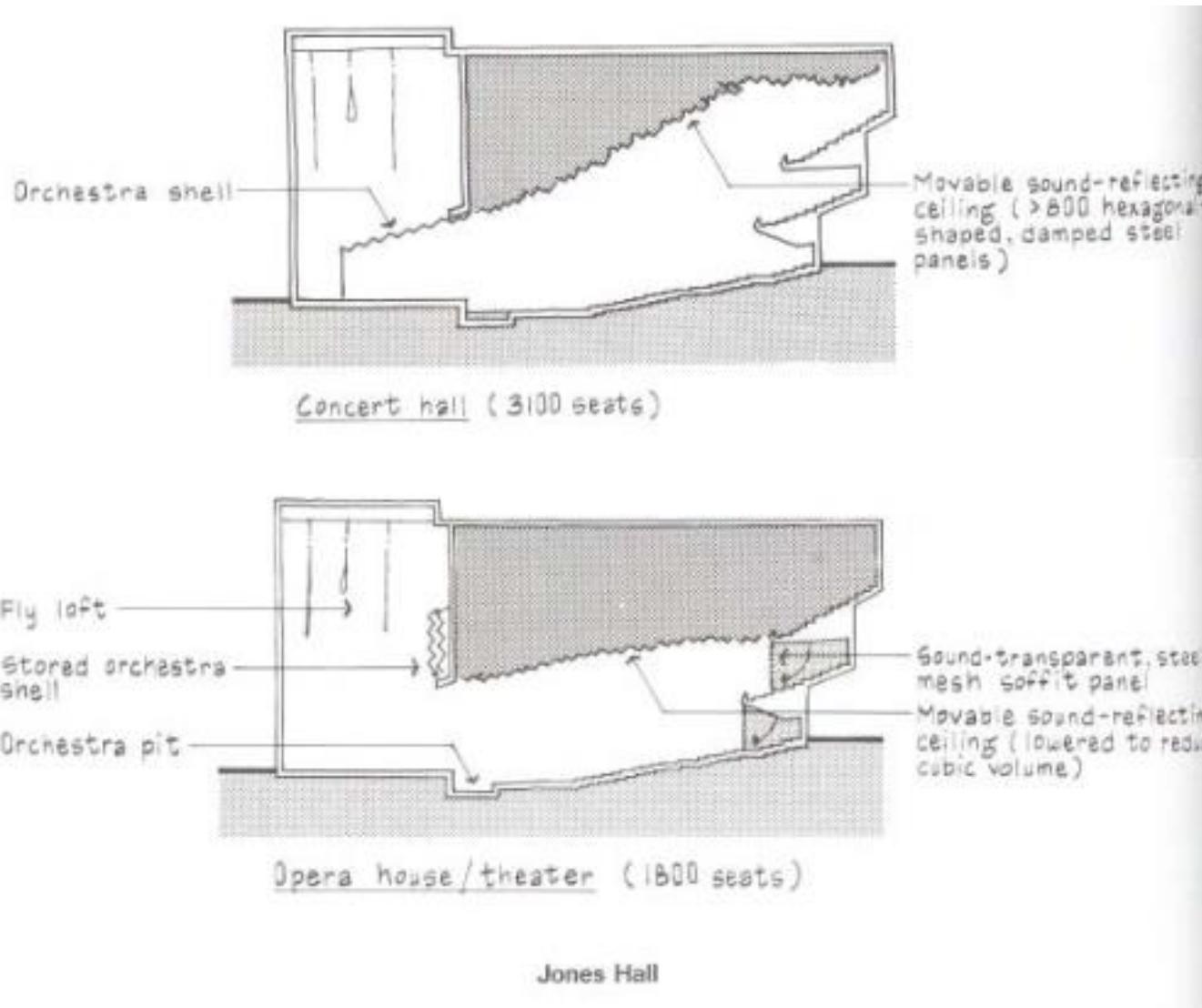
- Paneles móviles suspendidos del techo



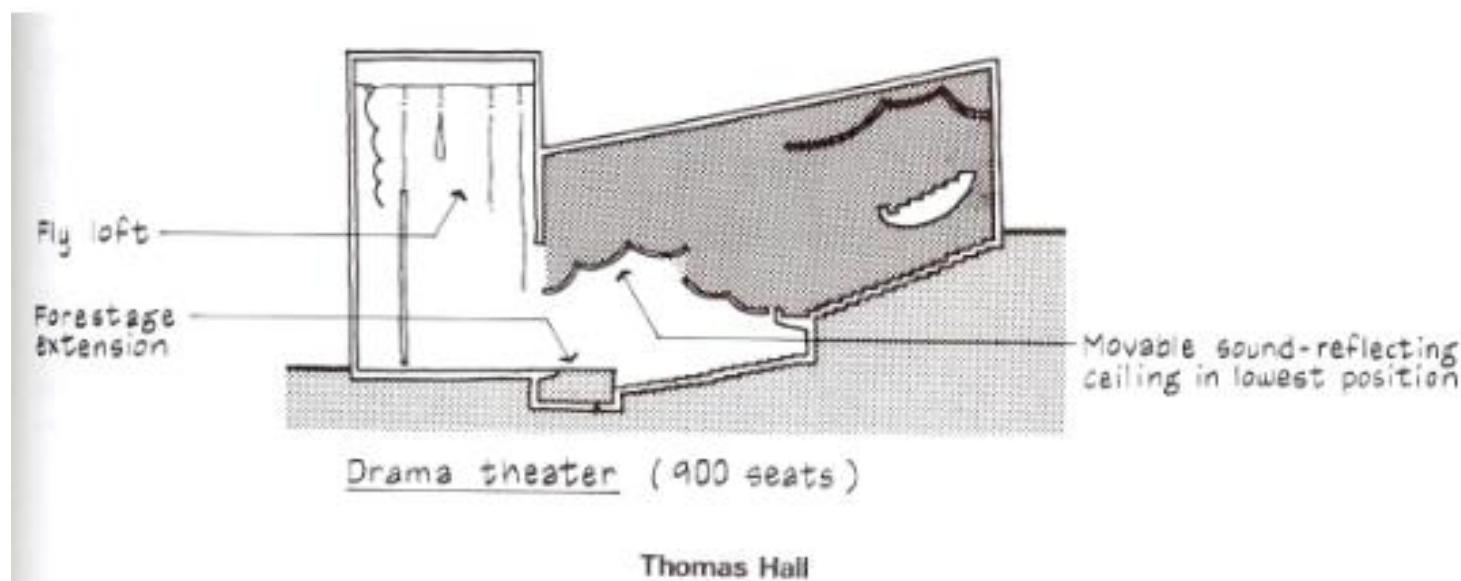
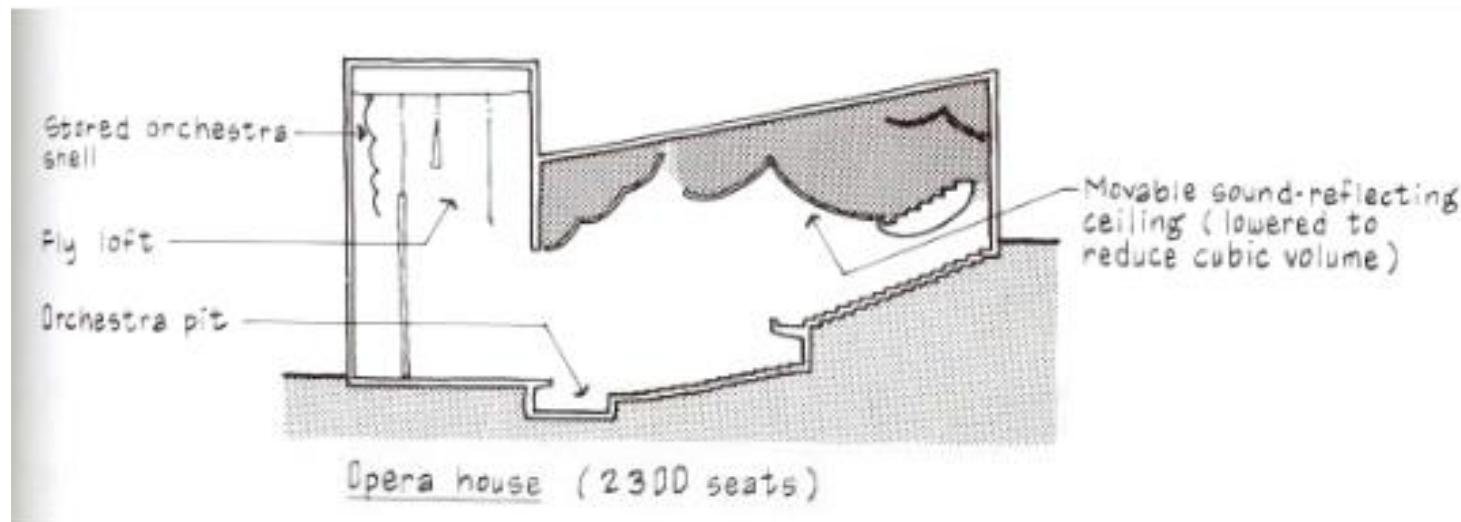
Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (California, EE.UU.):
a) configuración de sala de conciertos; b) representación de reflexiones de primer orden

Veterans' Memorial Auditorium, San Rafael (California, EE.UU.):
a) configuración de teatro; b) representación de reflexiones de primer orden

- *Paneles móviles suspendidos del techo*



- Paneles móviles suspendidos del techo

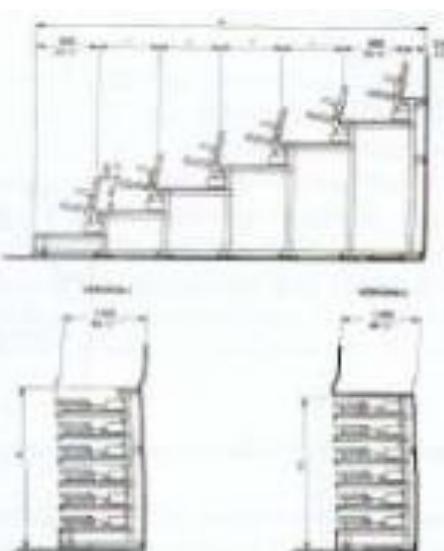


- **Sillas móviles**

- Pueden diseñarse sillas móviles montadas sobre tribunas telescópicas, plataformas y guías. Para que el sistema provoque una variación significativa del RT debe cumplirse que las sillas retiradas o añadidas sean de elevada absorción (alto porcentaje de tapizado) y su número, elevado.



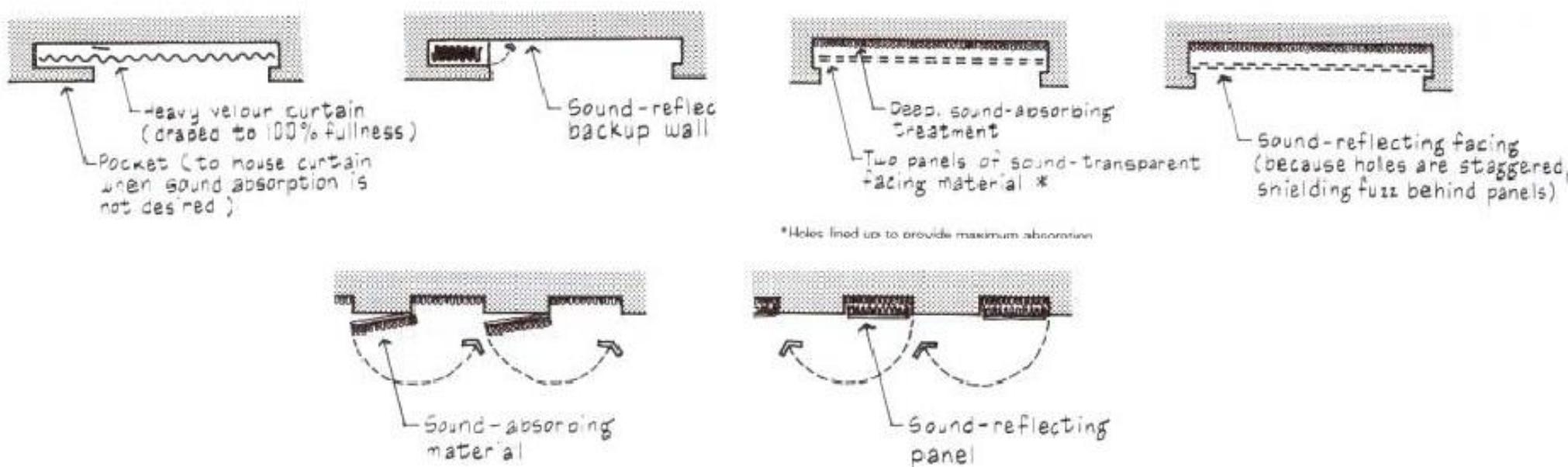
Sistema de tribunas telescópicas instalado en la sala Kotobuki, Japón (Système-C de Fijuras International Seating, S.A.)



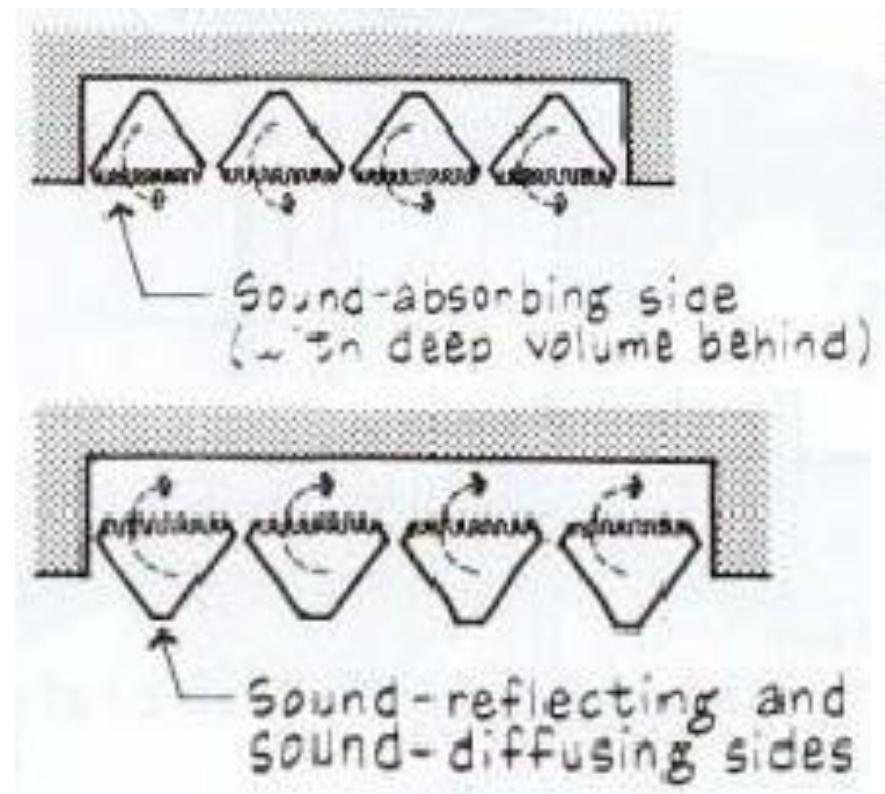
Sistema Multimat instalado en la sala de conferencias del Palacio de la Mutualidad, París, Francia (sillas de la serie Multi-Space de Fijuras International Seating, S.A.)

- **Variación de la absorción adicional**
 - Es el método más generalizado. Más efectivo en salas pequeñas. Es indispensable que la superficie de absorción variable sea comparable a la superficie de la audiencia. Existen diferentes métodos de llevarlo a cabo:
- **Cortinas**
 - El uso de cortinas de elevado coeficiente de absorción (alta densidad) delante de paredes reflectantes es uno de los métodos más extendidos. Deben situarse a cierta distancia de la pared (y a distancias variables) para aumentar la pobre absorción que tienen a bajas frecuencias.

- **Paneles móviles reflectantes, paneles perforados superpuestos, paneles giratorios**
 - Son paneles formados por diferentes materiales. Se puede escoger, depende de los requerimientos del uso de la sala, la cara del material que se mostrará:



- Un ejemplo es el “trifusor”, material con tres caras para dotar a una sala de variabilidad acústica. Este elemento giratorio puede usarse como difusor, absorbente o reflectante.



- **Sistemas electrónicos de Rv artificial**

- En este caso la sala debe diseñarse con el RT mínimo requerido y posibilitar un incremento con un sistema electrónico.
- Metodología con sistemas electrónicos:
 - Captación de la señal sonora mediante micrófonos distribuidos en la sala
 - Procesado de la señal captada
 - Amplificación de la señal
 - Envío de la señal a través de altavoces distribuidos por la sala aumentando el campo reverberante
 - Existen varios sistemas: reverberación de canal múltiple (MCR), sistema de control acústico (ACS) y resonancia asistida (AR), etc.

- **Ejemplos:**

- “Stereo Rv” o “Ambiofini System”, Vermuelen
- “Acoustoelectric Auditorium”, H. Olson
- “Assisted Ressonance System”, P. Parkin
- “Philips Multichannel Amplification of Rv system”, N. Franssen
- “Early Reflectes Energy System” & “Delta stereophony system”, P. Veneklasen
- “System for Improved Acoustic Performance”
- “Acoustic Control System” & “Variable Room Acoustics System”
- “LARES System”
- “CARMEN System”
- “Constellation ” Meyer Sound

- **Sistemas IN-LINE:**

- Procesan el sonido directo
- Micrófonos directivos y cercanos a las fuentes
- Maximización del nivel directo-reverberante
- Altavoz en campo directo
- Se usan para añadir reflexiones tempranas
- El RT puede aumentar más introduciendo una unidad de reverberación al sistema

- **Sistemas NON-LINE:**

- Captan el sonido reverberante
- Micrófono en campo reverberante
- Minimización del nivel directo respecto al reverberante

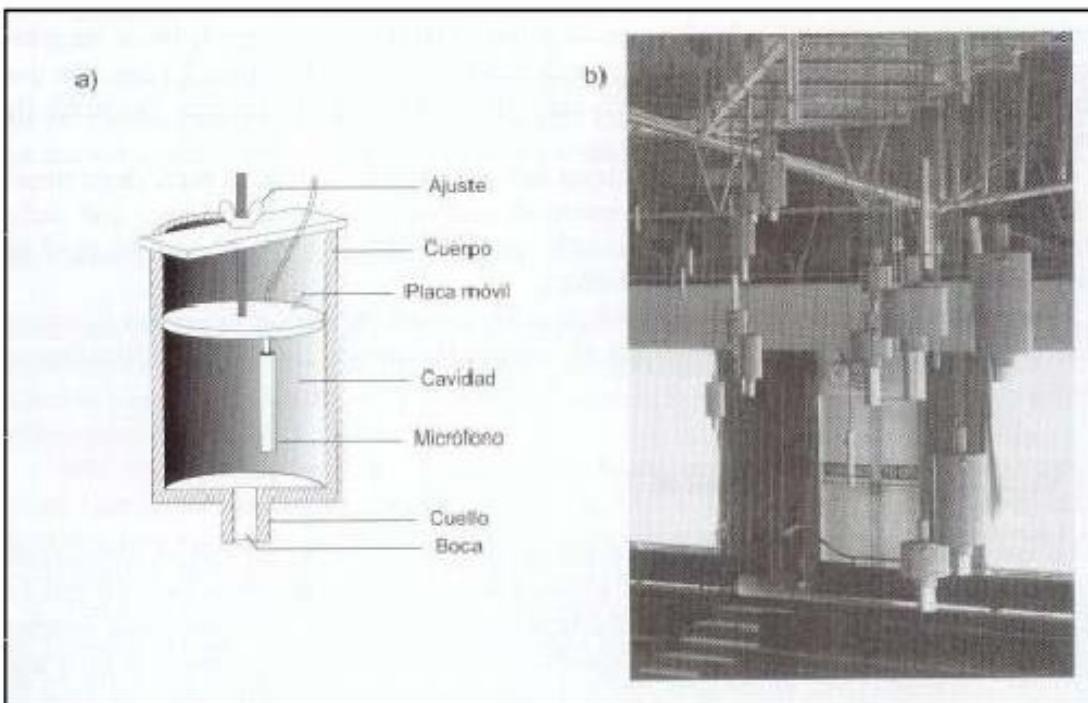
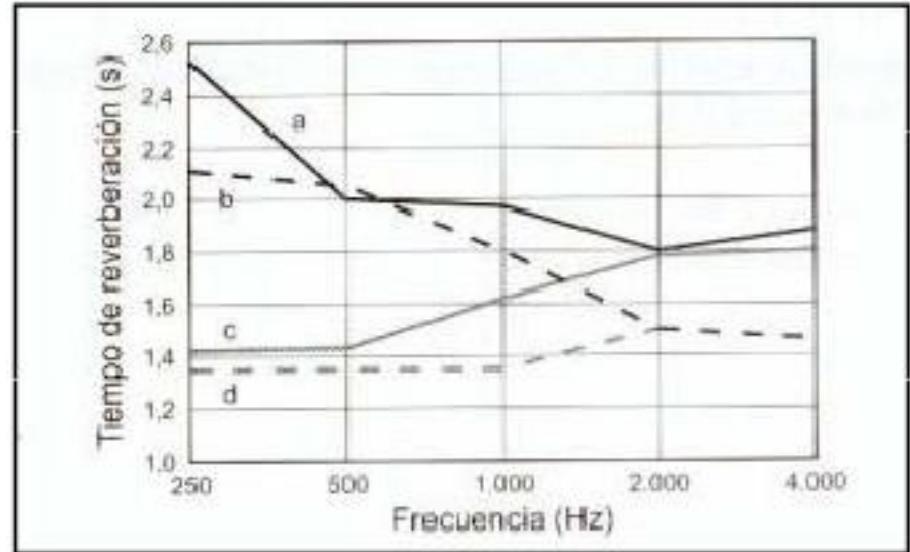
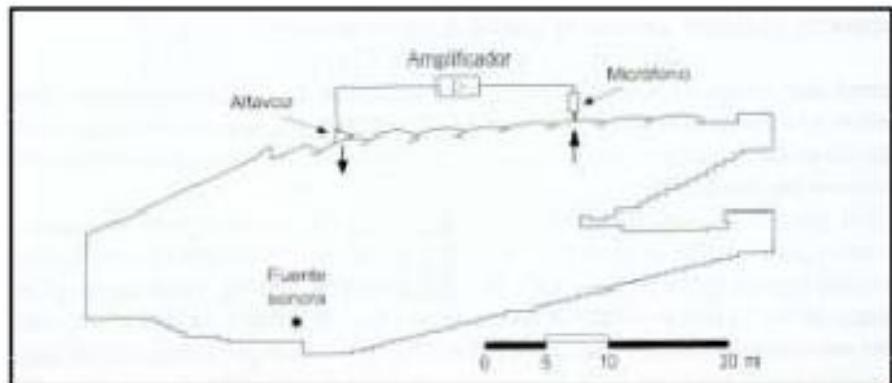
- **Diseño**
- **Sistemas IN-LINE:**
 - Directividad de los micrófonos
 - Distancia a la fuente
 - Selección de retardos
 - Posición de los altavoces
- **Sistemas NON-LINE:**
 - Número de canales
 - Ganancia deseada
 - Aumento de volumen aparente por medio de una unidad de reverberación

- **Sistemas usados generalmente:**
 - Mezcla de elementos IN-LINE y NON-LINE
 - En los N-L se colocan algunos micrófonos cercanos a las fuentes
 - Los elementos I-L se aprovechan para aumentar las ER
- **Parámetros a controlar de los sistemas de reverberación:**
 - Acoplamiento electroacústico
 - Ecualización de los sistemas
 - Simulación de reverberación artificial

- **Asisted Ressonance (AR)**

- Desarrollado por PH Parkin para mejorar la acústica del Royal Festival Hall de Londres. Última realimentación positiva controlada. Elevado número de canales (70-170)
- Método: La señal acústica se capta gracias a unos micrófonos situados dentro de la cavidad de unos resonadores de Helmholtz colocados por toda la sala. Esta captación permite obtener la señal filtrada que después se amplificará y enviará a unos altavoces aumentando la energía en la sala e incrementando el RT. Se diseñaron muchos resonadores de diferentes frecuencias para cubrir toda la banda frecuencial hasta 1200 Hz.

- **Asisted Ressonance (AR)**



- **Multichannel Amplification of Reverberation System (MCR)**
 - Encaminado a producir ganancia sonora y no de RT
 - Micrófonos en las paredes
 - Más efectivo a altas frecuencias
 - Número de canales muy elevado (100 para 3dB de ganancia)
 - Muy complejo (4 filtros por canal)
- **System for Improved Acoustic Performance (SIAP)**
 - Sistema de refuerzo de sonido IN-LINE
 - Pocos micrófonos (supercardioides)
 - Múltiples canales independientes
 - Gran número de altavoces

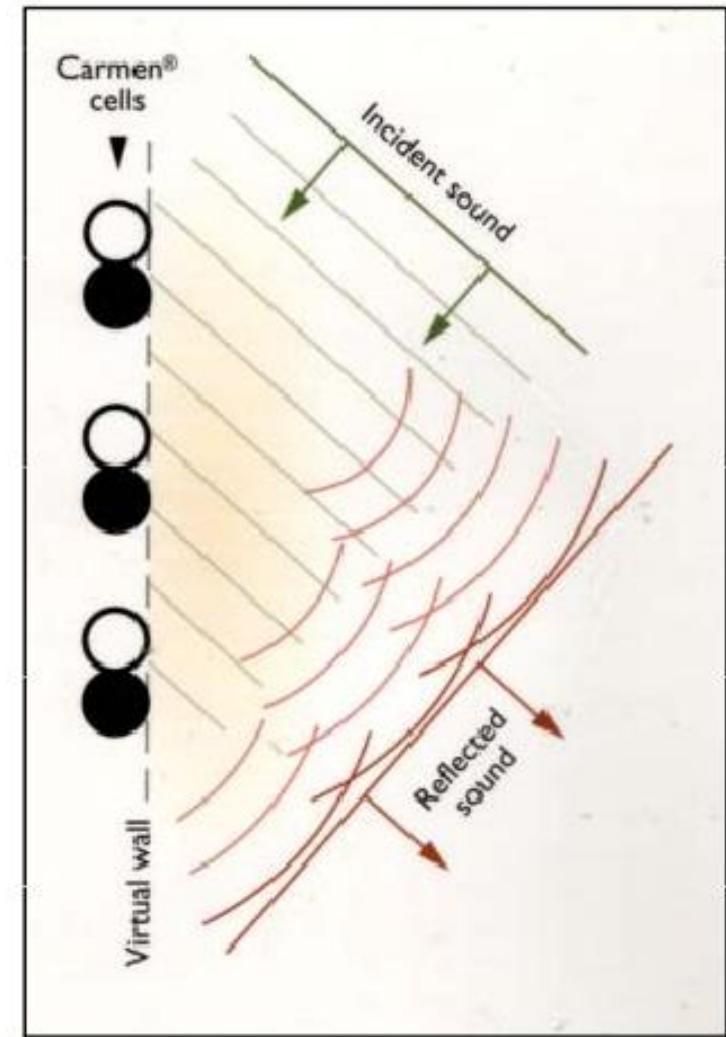
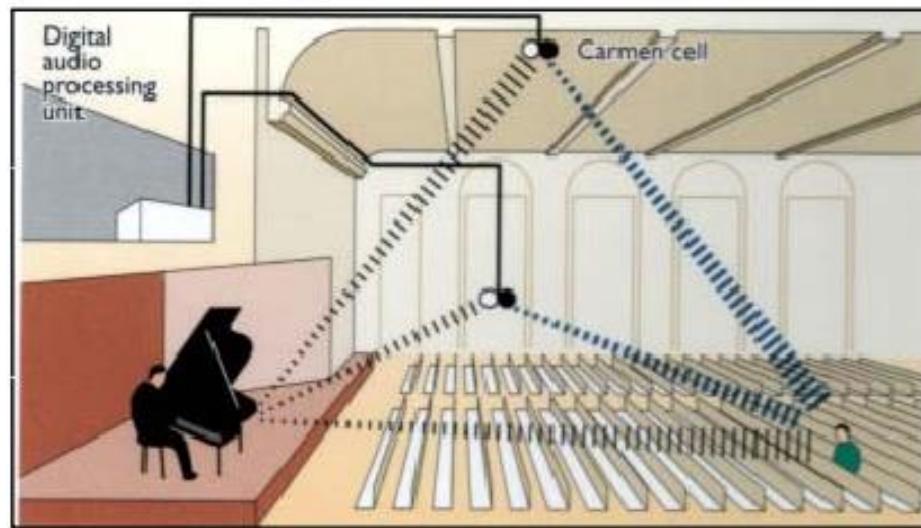
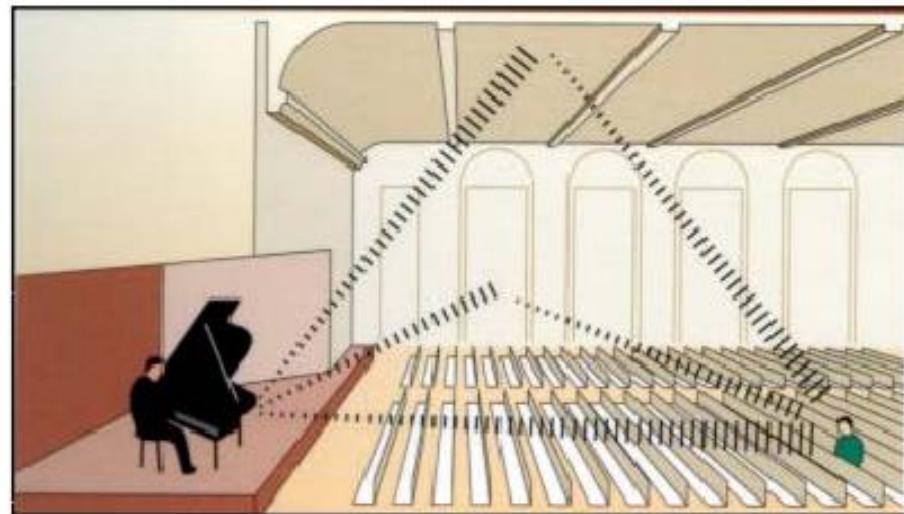
- **Acoustic Control System (ACS)**

- Crea primeras reflexiones y campo reverberante
- Antena de micrófonos supercardioides para captar sonido directo
- Las señales de los micrófonos son radiadas por los altavoces
- Se procesan las señales dando la RV deseada

- **CARMEN System**

- Basado en el principio de “paredes virtuales y células”
- Célula = micrófono + DSP + parlante
- Una pared virtual está formada por 20-30 células distintas
- Reproducción fiel del sonido
- Configuraciones preestablecidas

- **CARMEN System**



- **Variable Room Acoustics System (VRAS)**
 - Micrófonos y altavoces unidireccionales en campo reverberante
 - Se utilizan pocos canales
 - La unidad de reverberación simula 2 salas acopladas
 - La ganancia del nivel es independiente de la ganancia de la reverberación
 - Existe la posibilidad de modificar el RT por bandas
 - Se logra gran difusión de la señal

- **Ventajas sistemas electrónicos**

- RT más elevado a igual volumen de recinto
- Mayores márgenes de variación de RT
- Sistemas totalmente automatizados
- Sistemas más económicos

- **Inconvenientes sistemas electrónicos**

- Riesgo de sonido poco natural
- Riesgo de efectos de acoplamiento (efecto Larsen)
- Necesidad de control y mantenimiento permanente del equipo
- Funcionamiento óptimo sólo en una sala bien diseñada acústicamente

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

- **Percepción y calidad de un recinto**
 - La percepción y evaluación de la calidad de un recinto puede ser hecha de dos formas:
 - ✓ Una evaluación subjetiva (por testeo sobre una población)
 - ✓ Una evaluación objetiva (según criterios acústicos)

- La evaluación subjetiva
- Existen 6 dimensiones por el espacio perceptivo:
 - La amplitud sonora (*Loudness*)
 - El efecto de espacio (*Envelopment*)
 - La precisión (*Clarity*)
 - La intimidad (*Intimacy*)
 - La reverberancia (*Reverberance*)
 - El equilibrio tonal (*Balance*)
- A estos parámetros hay que adjuntar el ruido de fondo que tiene que ser muy bajo (o inaudible)
- Las evaluaciones se obtienen por testeo

- Limitaciones de la evaluación perceptiva:
 - Número de personas a testear
 - Problemas de interpretación de las preguntas
 - Rotación de los asientos
 - Porcentaje de ocupación de la sala
 - Factores visuales, psicológicos
 - Tratamiento de los datos
 - ...
- La evaluación de una sala por los músicos es muy distinta: necesitan escucharse bien, escuchar el público,...

- La evaluación objetiva
 - Se distinguen dos finalidades de aplicación por una sala:
 - Salas aplicadas al habla (teatros) y a las conferencias
 - Salas aplicadas a la música
 - Criterios que se aplican en los dos casos:
 - ✓ El tiempo de reverberación: **EDT, TR30**
 - ✓ El nivel del ruido de fondo: **NC**
 - ✓ La claridad **C₅₀** y **C₈₀**

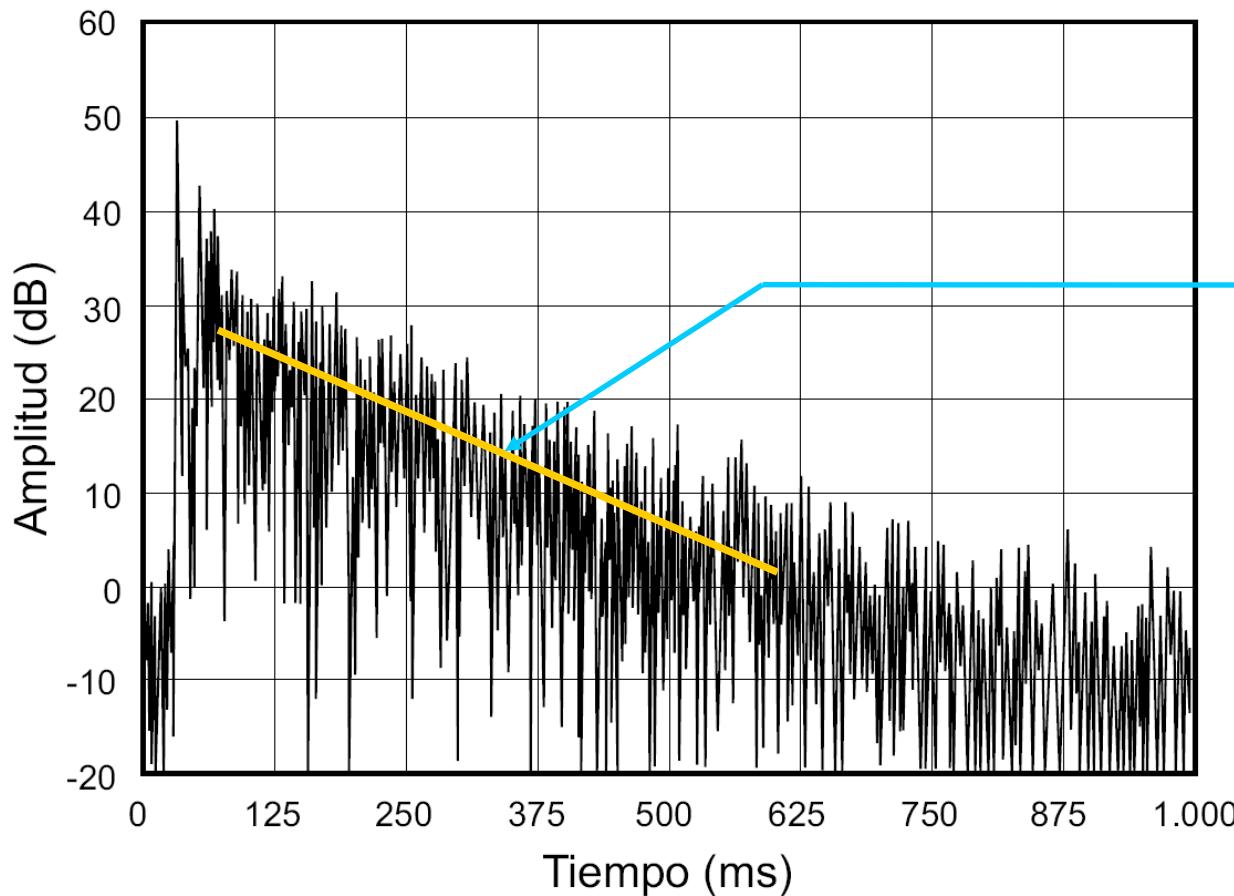
- Criterios aplicados específicamente para el habla:

- ✓ La definición **D**
- ✓ El **STI / RASTI** y el **%AICons**

- Criterios aplicados específicamente para la música:

- ✓ La sonoridad **G**
- ✓ El tiempo central **t_s**
- ✓ La eficiencia lateral **LF**
- ✓ La correlación cruzada interaural **IAAC**
- ✓ La calidez **BR** y el brillo **TR**

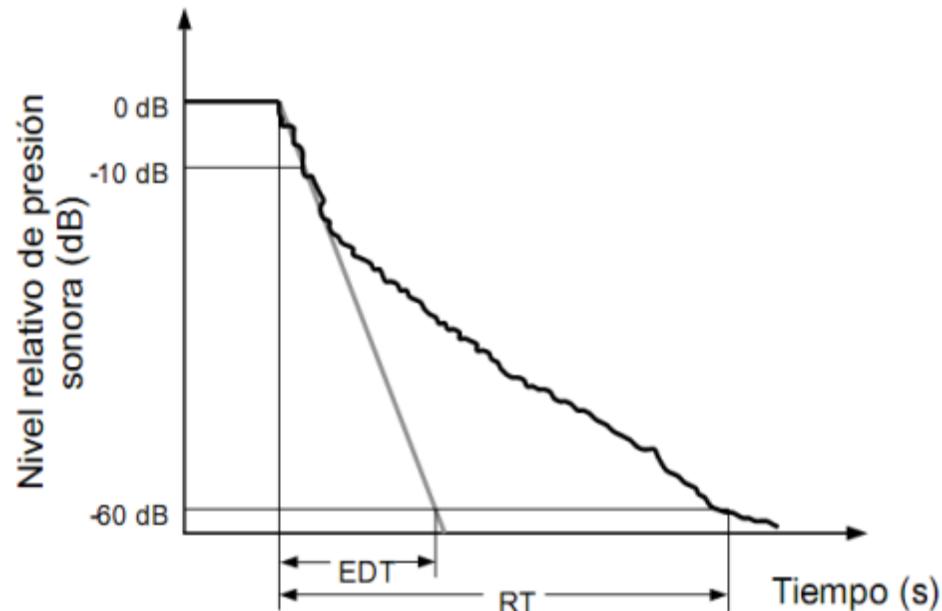
- **El tiempo de reverberación**
- El Tiempo de reverberación medido en un punto de un recinto tiene una forma compleja:



De la pendiente de
la curva saco el
TR?

- Como la curva del decaimiento energético no presenta una sola pendiente en escala logarítmica, se definieron otros parámetros para el TR:

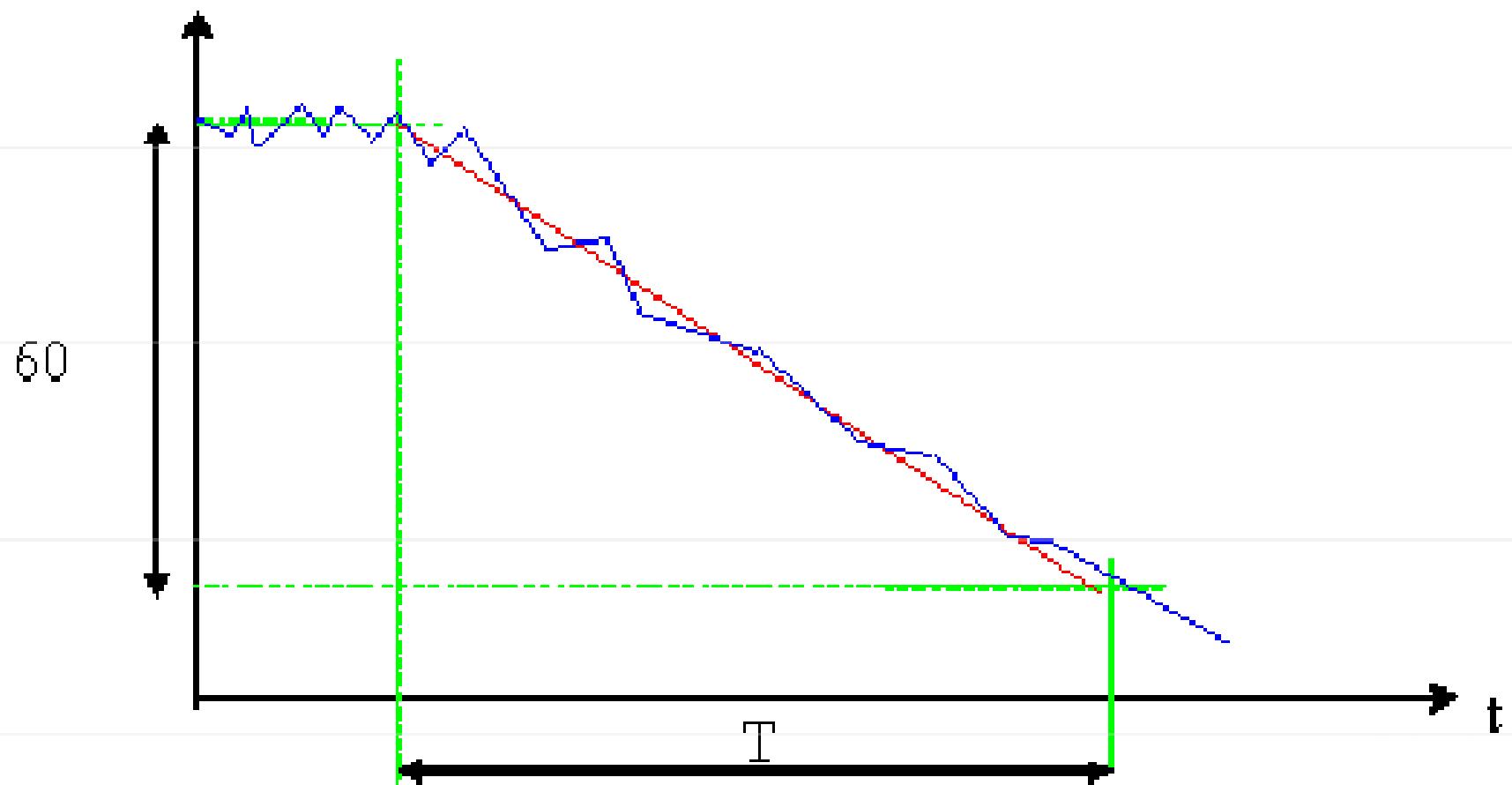
- El **EDT** “Early Decay Time” que corresponde a seis veces el tiempo para que el nivel relativo de presión pase de 0 a -10 dB
 - El **RT₃₀** que corresponde a dos veces el tiempo para que el nivel relativo pase de -5 a -35 dB



- El **EDT** traduce la impresión de viveza de una sala: si el **EDT** es significativamente menor al **RT**, la sala resulta mas apagada.
- Se recomienda para una buena difusión del sonido, que $\text{EDT}_{\text{mid}} = \text{RT}_{\text{mid}}$ el índice **mid** corresponde a las frecuencias centrales de 500 Hz – 1 kHz

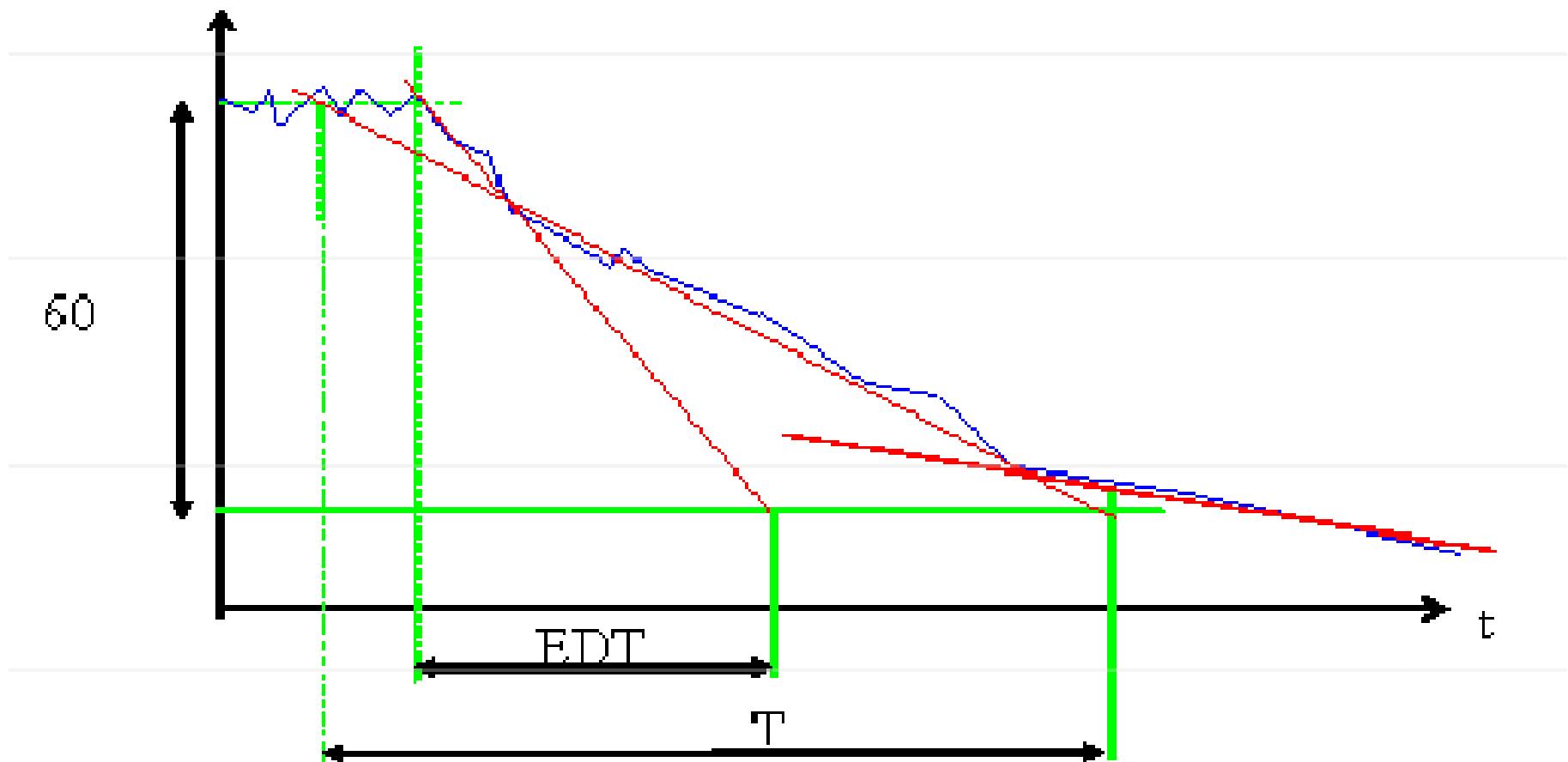
- Representación del RT en campo difuso

Nivel



- Representación del RT y EDT en campo no difuso

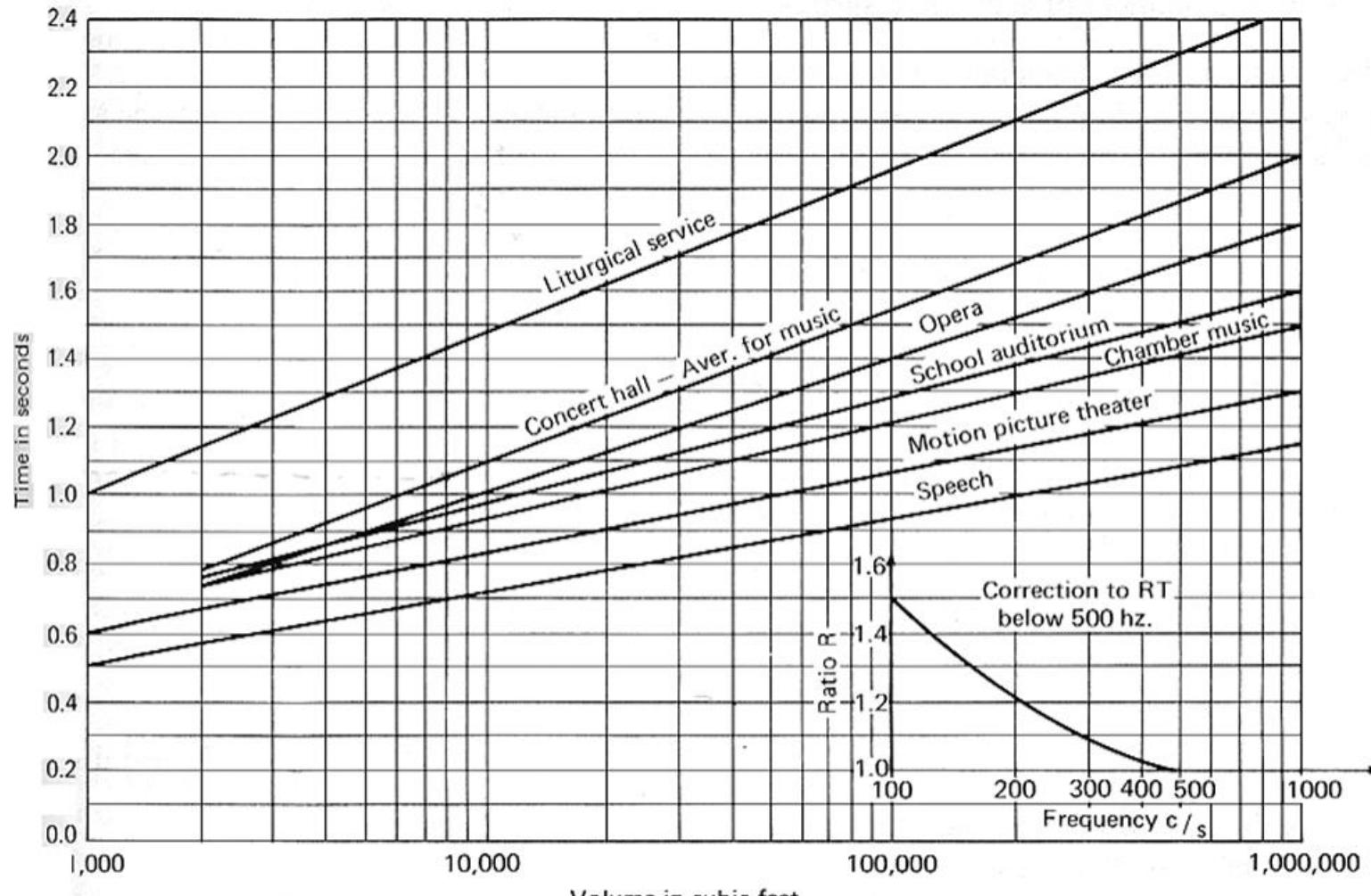
Nivel
(dB)



- Ejemplos de RT_{mid} (500 – 1 kHz) de referencia:

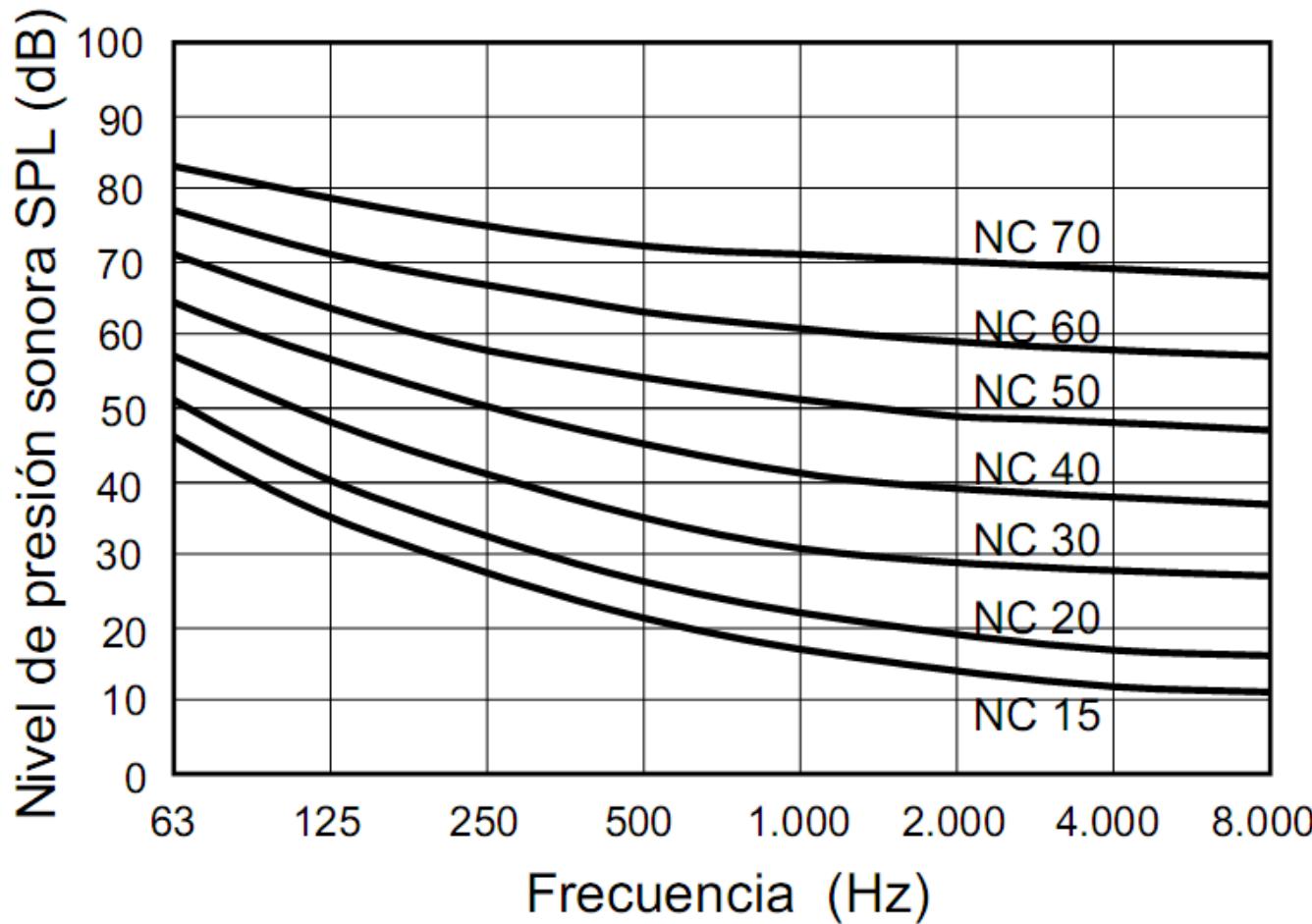
<i>Tipo de Sala</i>	RT_{mid} (s)
Estudio de grabación	0,2 - 0,4
Living, oficina	0,5 - 0,8
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	0,5 - 1,0
Sala polivalente	1,2 - 1,6
Teatro	1,2 - 1,5
Música de Cámara	1,3 - 1,7
Música sinfónica	1,7 - 2,0
Órgano o canto coral	2,0 - 3,0

- Ejemplos de RT_{mid} (500 – 1 kHz) de referencia:



Optimum reverberation time (500–800 Hz) versus volume (and correction below 500 Hz).

- **El ruido de fondo, las curvas NC (Noise criteria)**



- Se recomienda para los ambientes dedicados al habla un NC30 máximo y para los ambientes dedicados a la música un NC20 máximo

- **La claridad C_{50} (habla) y C_{80} (música)**
 - Define el grado de precisión sobre un sonido

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{+\infty} h^2(t) dt} \right)$$

Se recomienda un $C_{50} > 2$ dB para una buena claridad

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{+\infty} h^2(t) dt} \right)$$

Se recomienda un $-4 < C_{80} < 0$ dB en sala vacía ($0 -2 < C_{80} < 2$ dB en sala ocupada) para un grado de separación correcto entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical

Con $h^2(t)$ la respuesta impulsional

- **La definición D**

- Define la relación entre la energía llegando al oyente en los 50 ms y la energía total.
- Cuando mas elevado sea el parámetro, mejor será la inteligibilidad.

$$D = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t)dt}{\int_0^{+\infty} h^2(t)dt}$$

Se recomienda un **D > 0,5** en cada banda de 125 – 4 kHz en sala ocupada

■ El STI / RASTI y el %AlCons

- Parámetros ligados a la inteligibilidad de la palabra.
- El %AlCons define la perdida de articulación de consonantes (Peutz)
Se recomienda un **%AlCons < 5%** en sala ocupada
- El STI (*speech transmission index*) y el RASTI (*rapid speech transmission index*) también cuantifican el grado de inteligibilidad de las consonantes.
Se recomienda un **STI-RASTI > 0,65** en las bandas de 500 a 2 kHz en sala ocupada

- **La sonoridad G (sound strength, loudness)**
 - Define la relación entre el nivel total de presión sonora producido por una fuente omnidireccional en un punto determinado de una sala y el nivel producido por la misma fuente en un campo libre medido a 10 m.
 - Se entiende como el grado de amplificación producido por la sala.

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{+\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{+\infty} h_{10m}^2(t) dt} \right)$$

Se recomienda un **4 < G_{500Hz-1kHz} < 5,5 dB** en sala vacía

■ El tiempo central t_s

- Centro de gravedad de la respuesta impulsional
- A un t_s pequeño corresponde un sonido claro y a un t_s mas grande corresponde un reverberación mas preponderante.

$$t_s = \frac{\int_0^{+\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{+\infty} h^2(t) dt}$$

Se recomienda un **70 ms < t_s < 145 ms**

■ La eficiencia lateral LF (*spaciousness*)

- Parámetro ligado a la sensación de espacio percibido mas grande, que el sonido llega de múltiples direcciones:
 - La fuente sonora parece mas grande que lo que es
 - Sensación de seguridad, de estar “a dentro”, el sonido viene por todos lados (sensación de envolvente)
- Relación entre la energía llegando por el costado y la energía total en los 80ms

$$L_{EF} = \frac{\int_0^{5ms} h_b^2(t)dt}{\int_0^{80ms} h^2(t)dt}$$

Con $h_b^2(t)$ la respuesta impulsional medida por un micrófono bidireccional

Según Marshall se recomienda un $15\% < L_{EF} < 25\%$ en las bandas de 125 a 1 kHz en sala vacía

■ La correlación cruzada interaural IACC

- Correlación entre las respuestas impulsionales en ambos oídos
- Indica el grado de similitud entre ambos señales:
IACC = 1 si iguales y IACC = 0 si independientes
- Existe el IACC_E (early) calculado entre 0 y 80 ms aplicado al habla y el IACC_L (late) calculado entre 80 ms y 1 s aplicado a la música

$$IACC_{t_1, t_2} = \max \left| \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) h_R(t + \tau) d\tau}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t) dt}} \right|$$

Beranek propone un **0,6 < 1 - IACC < 0,7** en sala vacía en las bandas de 500Hz a 2 kHz

- **La calidez BR y el brillo TR**

- El brillo y la calidez son dos parámetros que se obtienen a partir del RT y que dan una idea de la respuesta de la sala a baja y alta frecuencia. Se dice que una sala presenta calidez acústica si presenta una buena respuesta a las frecuencias graves. Como medida objetiva de la calidez, se suele utilizar la relación entre el RT_{low} y el RT_{mid}
- La palabra calidez se ha adoptado en el léxico acústico para representar a la riqueza de baja frecuencia, la suavidad y la melosidad de la música en la sala. El criterio acústico para música es muy estricto indicando que la calidez valga 1.2; no obstante, para teatro puede variar de 0.9 hasta 1.3
- De forma similar, se dice que el sonido de una sala es brillante si presenta una buena respuesta a frecuencias altas. El brillo de una sala depende fundamentalmente de la relación entre el RT_{high} y el RT_{mid}
- El adjetivo brillante se ha elegido como indicativo de que el sonido en la sala es claro y rico en armónicos. El valor de este parámetro tiene que ser lo más alto posible teniendo presente que es difícil que pueda llegar a 1 debido a la absorción del aire, pero intentando que no sea en ningún caso inferior a 0.8

- **La calidez BR y el brillo TR**

- Parámetros describiendo el aporte de una sala a la coloración tonal de un sonido (influencia sobre el timbre)

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$

Traduce la riqueza en sonidos graves, la melosidad y suavidad de la música

$$TR = \frac{T_{2000Hz} + T_{4000Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$

Traduce la riqueza en sonidos agudos

Beranek propone los valores siguientes:

1,1 < BR < 1,25 cuando $RT_{mid} = 2,2$ s

1,1 < BR < 1,45 cuando $RT_{mid} = 1,8$ s

TR > 0,87

Capítulo 5: Introducción a la acústica arquitectónica

6. Percepción y calidad de un recinto

- Tabla recapitulativa

Nombre del Criterio	Música	Habla	Dimensión perceptiva equivalente
RT30	Si	Si	Reverberancia, amplitud sonora
EDT	Si	Si	Viveza, precisión
Ruido de fondo NC	Si	Si	Ruido de fondo
Claridad C	Si	Si	Precisión, grado de separación
Definición D	No	Si	Inteligibilidad
STI / RASTI	No	Si	Inteligibilidad
Sonoridad G	Si	No	Amplitud sonora
Tiempo central t_s	Si	no	Precisión
eficiencia lateral LF	Si	No	Efecto de espacio, amplitud aparente de la fuente
correlación cruzada interaural IACC	Si	No	Efecto de espacio, sensación de envolvente
Calidez BR y Brillo TR	Si	No	Equilibrio tonal

1. Conceptos generales
2. Estudio ondulatorio de los recintos
3. Modelos estadísticos de la acústica de salas y tiempo de reverberación
4. La absorción acústica
5. El acondicionamiento acústico de recintos
6. Percepción y calidad de un recinto
7. Medir en acústica arquitectónica

- **Medir en acústica arquitectónica**
 - La fuente sonora
 - Ruido Estacionario
 - Se miden los niveles de presión sonora en distintos puntos de la sala con un sonómetro
 - Ruido Interrumpido
 - Se mide el decaimiento del sonido después que se apague una fuente
 - Ruido Impulsivo
 - Se mide el decaimiento del sonido después una excitación impulsional generada por un cohete, un globo, una pistola, un “wooden hand clapper”,...

■ El método del ruido interrumpido

- Método descrito en la norma ISO 3382 “Measurement of room acoustic parameters”
- Por la fuente se necesita un parlante omnidireccional:
⇒ se utiliza un dodecaedro (figura de 12 parlantes) o un icosaedro (figura de 20 parlantes)



Dodecaedro de la marca Cesva Instruments

- Método necesitando un equipamiento importante

■ El método del ruido impulsivo

- Método sencillo, necesitando poco equipamiento
- Difícil de controlar la directividad



Ilustración de los métodos impulsivos (izquierda) y interrumpidos (derecha)

■ El método del ruido pseudo-impulsivo:

- Método conocido con el nombre de MLS “Maximum Length Sequences”
- Señal compuesta por una sucesión de 0 y de 1
Por ejemplo la secuencia de rango 3 se escribe en la forma: 1,1,-1,-1,1,-1,1
- Aventajas: la función de autocorrelación de la señal MLS es igual una impulsión.
- La correlación cruzada entre la señal de la fuente y la señal medida permite conocer la respuesta impulsional de un recinto

⇒ Permite reducir el nivel de ruido

■ El método del log sine sweep:

- Conocida como el barrido de frecuencia logarítmico
- Método que permite mejorar la relación señal a ruido
- Permite obtener una buena respuesta en el rango de interés de 20 a 20 kHz

- Los equipos de medición
 - El sonómetro (*muchos tienen ya un modulo dedicado a la medición del TR*)
 - El micrófono omnidireccional
 - El micrófono bidireccional para la medición de la eficiencia lateral
 - La cabeza artificial para la medición de la correlación interaural cruzada

