SONIDO
Parte 2

Temario

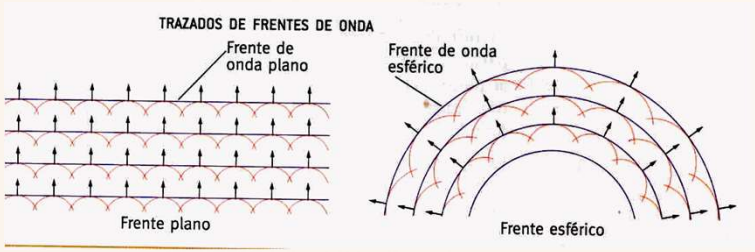
Fenómenos de propagación del sonido

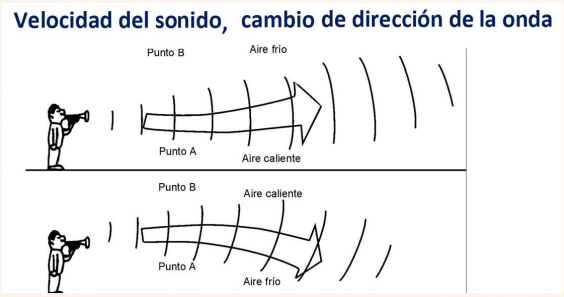
- Dirección de propagación y frente de onda
- Ley general de reflexión
- El efecto de eco
- Efecto de reverberación
- Tiempo de reverberación
- Efecto de difracción
- Efecto de resonancia

El sonido en el hecho constructivo

- Consideraciones Generales
- Absorción del sonido - Coeficiente de absorción y absorción total
- Aislación con distintos materiales
- Aislamiento simple
- Aislamiento múltiple

Fenómenos de Propagación del Sonido





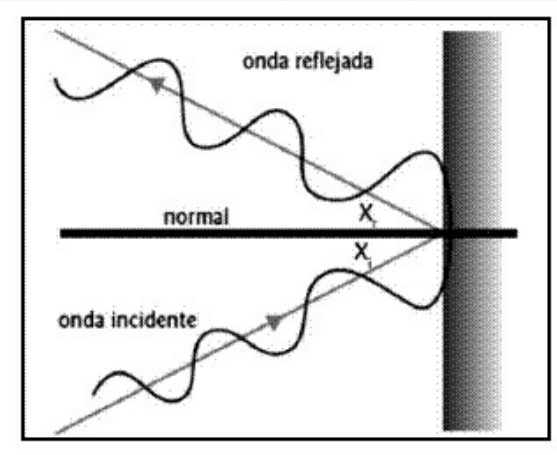
Dirección de Propagación y Frente de Onda

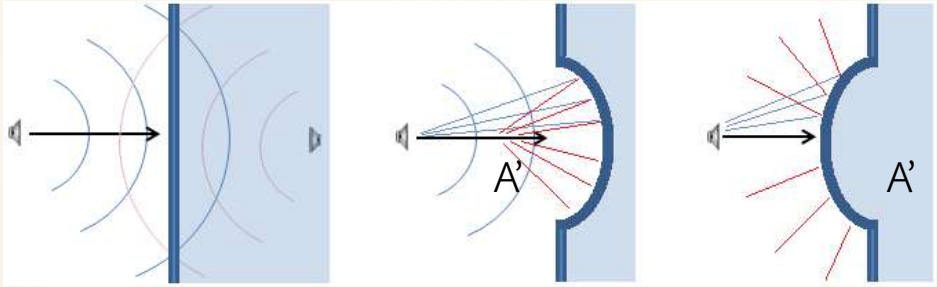
Dirección de propagación: Es siempre rectilínea en un medio homogéneo e isótropo.

Frente de onda: Se extiende en forma radial y tridimensional (frentes esféricos concéntricos) a partir de la fuente emisora de sonido.

Representación: Permite estudiar el comportamiento del sonido considerando tanto los rayos (dirección) como las superficies esféricas dilatadas (frente de onda).

Fenómenos de Propagación del Sonido





Ley General de Reflexión

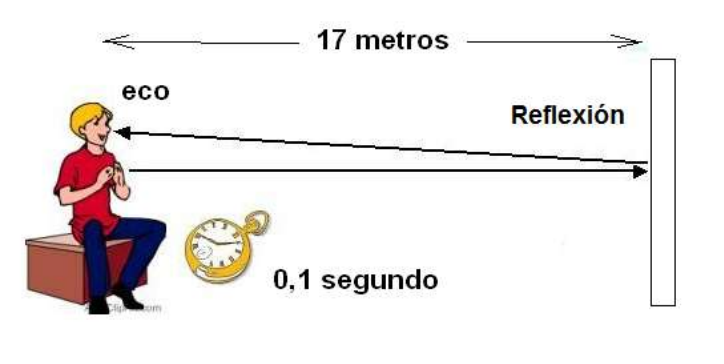
Comportamiento: Al chocar contra un obstáculo o superficie, el sonido se refleja cumpliendo la ley en la que el **ángulo de incidencia (α_i) es igual al ángulo de reflexión (α_r)**, ambos medidos respecto a la normal de la superficie en el punto de incidencia.

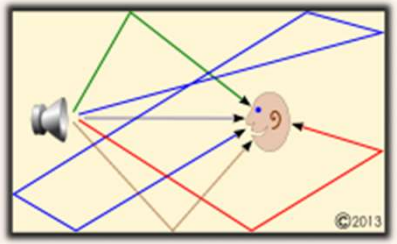
Superficies curvas:

- Las superficies **cóncavas** concentran los rayos reflejados.
- Las superficies **convexas** dispersan los rayos reflejados.

Centro virtual: La onda reflejada equivale a una nueva onda cuyo centro virtual (A') se ubica de forma simétrica al origen (A) con respecto a la pared

Fenómenos de Propagación del Sonido





El Efecto de Eco

Causa: Se produce cuando el oyente percibe el sonido directo y el reflejado de forma **separada y** claramente distinguible.

Persistencia **acústica:** El oído humano conserva la impresión sonora durante $\frac{1}{10}$de segundo ($0{,}1$ s).

Condición de distancia: Como la velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s, en $0{,}1$ s recorre 34 m.

- Para percibir eco, la diferencia entre el camino reflejado y el directo debe ser **mayor o igual a** 34 m.
- Si el propio emisor busca escuchar su eco frente a una pared, debe estar ubicado a una **distancia mayor a** 17 mde la superficie reflejante (17 m de ida y 17 mde vuelta)

Ejercicio 1: Distancia crítica para prevenir el efecto de Eco en un patio escolar

Se proyecta un patio abierto en un centro educativo delimitado por un muro perimetral de hormigón reflejante. Un orador se ubica cerca del centro de la explanada. Se busca determinar la distancia mínima a la pared reflejante para evitar que el orador escuche su propio eco y sufra interferencias al hablar.

- Datos:
- Velocidad del sonido en el aire: $v = 340$ m/s
- Persistencia acústica del oído humano: $t = 0{,}1$ s(1/10 de segundo)

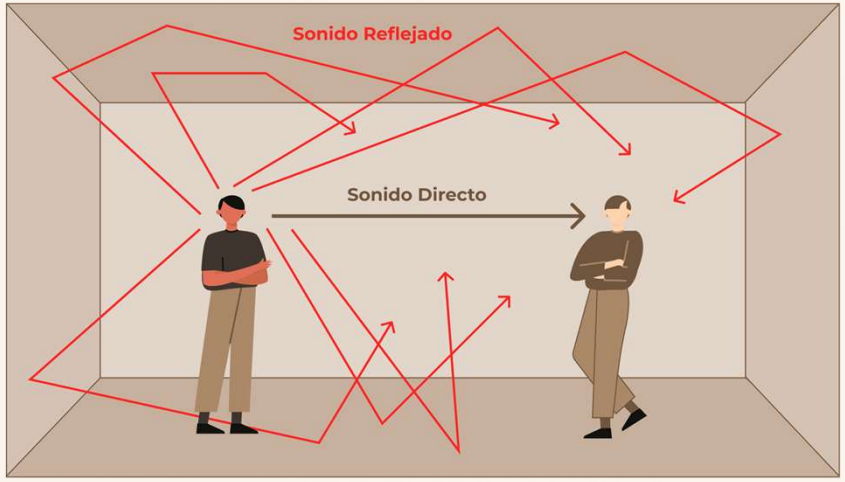
Preguntas:

- Demostrar analíticamente la distancia mínima ($d_{\min}$) entre la fuente/emisor y el muro para que se produzca el fenómeno de eco.
- Si un oyente se encuentra ubicado a 10 m de la fuente directa y a 25 m del punto de reflexión en el muro, ¿percibirá el sonido reflejado como un eco o como una superposición/refuerzo del sonido directo? Justificar.

Resolución:

- Distancia mínima al muro:
- Distancia total recorrida por la onda en la persistencia del oído:
- $\Delta x = v \cdot t = 340 \text{ m/s} \cdot 0{,}1 \text{ s} = 34 \text{ m}$
- Como el sonido viaja desde el emisor hasta el muro y regresa (camino de ida y vuelta):
- $d_{\min} = \frac{\Delta x}{2} = \frac{34 \text{ m}}{2} = 17 \text{ m}$
- Análisis del oyente:
- Camino directo: $d_{\text{directo}} = 10 \text{ m}$
- Camino reflejado: $d_{\text{reflejado}} = 25 \text{ m}$
- Diferencia de caminos: $\Delta d = d_{\text{reflejado}} - d_{\text{directo}} = 25 \text{ m} - 10 \text{ m} = 15 \text{ m}$
- Retardo temporal: $\Delta t = \frac{\Delta d}{v} = \frac{15 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} \approx 0{,}044 \text{ s} \quad (44 \text{ ms})$
- Como $\Delta t = 0{,}044 \text{ s} < 0{,}1 \text{ s}$, la diferencia de recorridos no alcanza los 34 m. Por lo tanto, el oyente **no percibe eco**, sino un refuerzo/reverberación inicial.
- Dibujar la situación

Fenómenos de Propagación del Sonido

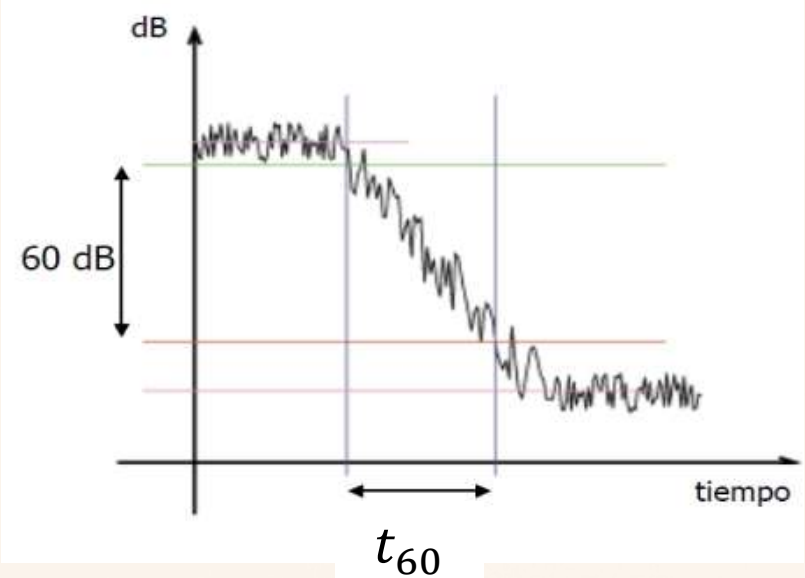


Efecto de Reverberación

Definición: Es la **persistencia del sonido** dentro de un recinto cerrado debido a las múltiples y sucesivas reflexiones que sufren las ondas en las superficies limitantes.

Mecanismo: En cada reflexión, los materiales absorben una fracción de energía (α), haciendo que el nivel sonoro decaiga de forma progresiva una vez que sale de la fuente.

Fenómenos de Propagación del Sonido



Tiempo de Reverberación (t_{60})

Definición: Es el tiempo (en segundos) que tarda el nivel de presión sonora en **disminuir 60** dB dentro de un recinto, a partir del momento en que se interrumpe la emisión de la fuente.

Fórmula de Sabine:

$$t_{60} = \frac{0{,}16 \cdot V}{A_T} \quad [\text{s}]$$

- V: Volumen del recinto (m^3).
- A_T: Absorción acústica total del recinto (m^2).

$$A_T = \sum (S_i \cdot \alpha_i)$$

α_i: indice de absorción
S_i: superficie

α_i

*I*ndice de absorción depende de la frecuencia

Material	Coeficiente de absorción α a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m^2	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m^2	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m^2	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m^2 fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97

Ejercicio 2: Verificación del Tiempo de Reverberación (t_{60}) mediante la fórmula de Sabine

Un recinto destinado a aula universitaria tiene dimensiones de 10 m de largo, 8 m de ancho y 3 m de altura ($V = 240$ m^3). Se realiza la evaluación acústica para determinar la inteligibilidad de la palabra.

- Datos:
- Volumen del recinto (V): 240 m^3
- Absorción acústica total (A_T): 48 m^2
- Tiempo de reverberación recomendado para habla/palabra: $t_{60,\text{óptimo}} \approx 0{,}7$ s a $0{,}9$ s.

- Fórmula de Sabine:

$$t_{60} = 0{,}16 \cdot \frac{V}{A_T} \quad \text{[segundos]}$$

- Preguntas:

Calcular el tiempo de reverberación (t_{60}) actual del recinto.

Determinar la Absorción Total requerida ($A_{T,\text{requerida}}$) para lograr un t_{60} óptimo de $0{,}8$ s.

Indicar si se deben agregar o retirar materiales absorbentes.

- Resolución:
- Cálculo del t_{60} actual:

$$t_{60} = 0{,}16 \cdot \frac{240 \text{ m}^3}{48 \text{ m}^2} = 0{,}16 \cdot 5 = 0{,}80 \text{ s}$$

- Verificación y ajuste:

El valor obtenido ($0{,}80$ s) entra exactamente en el rango óptimo deseado para salones de clase o conferencias.

- Conclusión teórica: Como el tiempo de caída de 60 dB del nivel de presión sonora dura $0{,}8$ s, las reflexiones no enmascaran las sílabas subsiguientes, garantizando una adecuada inteligibilidad de la palabra.

¿De donde sale Absorción acústica total (A_T): 48 m^2?

Fundamento teórico de la Absorción Total (A_T)
Se utiliza la siguiente sumatoria:

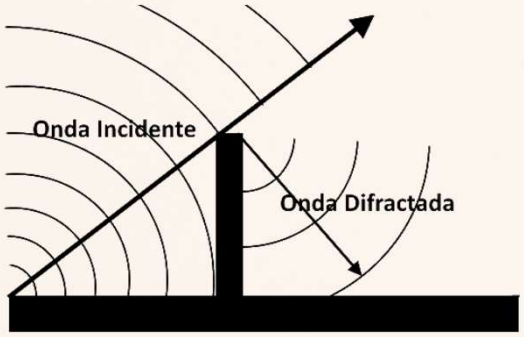
$$A_T = \sum (S_i \cdot \alpha_i) + A_{\text{personas/mobiliario}}$$

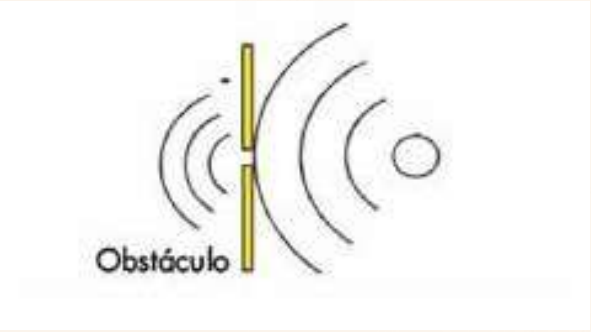
Donde:
S_i: Superficie de cada cerramiento en metros cuadrados (m^2).
α_i: Coeficiente de absorción del material. Es un número adimensional entre 0(reflexión total) y 1(absorción total).
A_T: Área de absorción equivalente medida en m^2 sabin (o sabines métricos).

Dadas las dimensiones del aula del ejercicio (10 m $\times$ 8 m $\times$ 3 m):
Piso: 80 m^2
Techo: 80 m^2
Paredes: $2 \times (10 \times 3) + 2 \times (8 \times 3) = 108$ m^2
Superficie total envolvente: 268 m^2

Elemento / Material	Área / Cantidad	Coeficiente (α)	Absorción equivalente
Cielorraso (Placas fonoabsorbentes)	$80\ \text{m}^2$	$0,40$	$32,0\ \text{m}^2$
Paredes (Mampostería revocada/pintada)	$108\ \text{m}^2$	$0,05$	$5,4\ \text{m}^2$
Piso (Mosaico / Cerámico)	$80\ \text{m}^2$	$0,02$	$1,6\ \text{m}^2$
Personas / Mobiliario (Ej: 30 alumnos)	30 pers.	$0,30\ \text{m}^2/\text{pers.}$	$9,0\ \text{m}^2$
Absorción Total (A_T			$48,0\ \text{m}^2$

Fenómenos de Propagación del Sonido





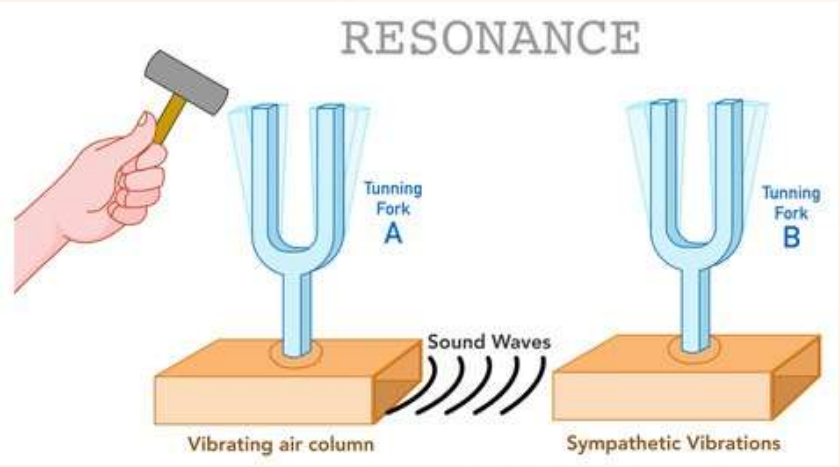
Efecto de Difracción

Definición: Ocurre cuando el sonido encuentra en su trayectoria obstáculos aislados o aberturas y los bordea o atraviesa, cambiando la dirección del frente de onda.

Borde de obstáculos: Los extremos del obstáculo se convierten en nuevos centros de emisión de frentes de onda difractados.

Orificios reducidos: Si el sonido pasa por una abertura muy pequeña, esta actúa prácticamente como una fuente puntual original, emitiendo ondas esféricas concéntricas hacia el otro lado.

Fenómenos de Propagación del Sonido



Efecto de Resonancia

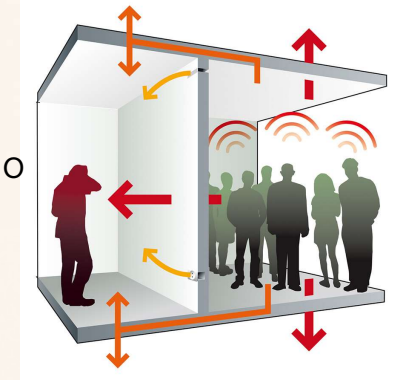
Definición: Fenómeno por el cual un cuerpo u objeto entra en vibración al recibir una onda sonora de frecuencia y período idénticos a su frecuencia natural de vibración.

En el hecho constructivo: Se manifiesta en la vibración de paredes por ascensores, cañerías por bombas de agua, o conductos por equipos de aire acondicionado.

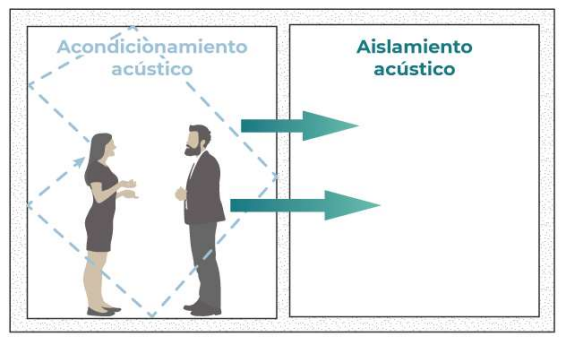
Solución arquitectónica: Interponer aislantes acústicos para ruido aéreo y **materiales elásticos** (antivibratorios) para evitar la transmisión por vía sólida.

El Sonido en el Hecho Constructivo

Semiespacio Receptor



Semiespacio Emisor

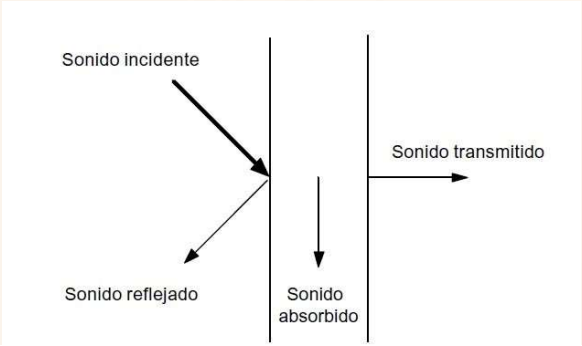


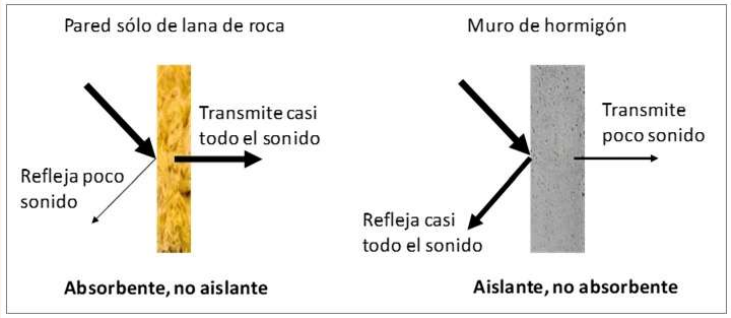
Consideraciones Generales

Doble exigencia acústica: En el diseño arquitectónico se deben atender dos problemas de naturaleza distinta:

- **Acondicionamiento acústico interior:** Control de las reflexiones internas para optimizar la audición (inteligibilidad de la palabra o calidad musical).
- **Aislamiento acústico exterior/interiores:** Impedir el paso de ruidos molestos provenientes del exterior o de locales contiguos.

El Sonido en el Hecho Constructivo





Absorción del Sonido: Coeficiente y Absorción Total

Mecanismo de absorción: Al incidir una onda sonora sobre un material, parte de la energía se refleja, otra se transmite y el resto es disipada en forma de calor por rozamiento en los poros.

Coeficiente de absorción (α): Relación entre la energía acústica absorbida (E_a) y la energía sonora incidente (E_i).

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad \text{(Valores entre } 0 \text{ y } 1\text{)}$$

- $\alpha = 0$: Superficie totalmente reflejante (plana y dura).
- $\alpha = 1$: Absorción total (ej. una ventana abierta de par en par).

Absorción Total (A_T): Sumatoria de la capacidad de absorción de todas las superficies internas del recinto:

$$A_T = \sum (S_i \cdot \alpha_i) = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \cdots + S_n\alpha_n \quad [\text{m}^2 \text{ de absorción equivalente o Sabines}]$$

Ejercicio 3: Absorción Acústica Total (A_T) de una sala de conferencias

Se proyecta un aula magna con una superficie total de envolvente interna que combina materiales reflejantes y absorbentes para controlar el acondicionamiento interior.

Datos de la envolvente:

Paredes laterales y fondo (S_1): 180 m^2 de revoque liso ($\alpha_1 = 0{,}04$).

Cielorraso (S_2): 120 m^2 de placas acústicas porosas ($\alpha_2 = 0{,}65$).

Piso (S_3): 120 m^2 con alfombra sobre contrapiso ($\alpha_3 = 0{,}25$).

Muro frontal/escenario (S_4): 40 m^2 de paneles de madera ($\alpha_4 = 0{,}10$).

Ventana de vidrio (S_5): 20 m^2 de ventanal fijo ($\alpha_5 = 0{,}05$).

Fórmula:

- $A_T = \sum S_i \cdot \alpha_i = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \cdots + S_n\alpha_n$ [m^2 de absorción equivalente o Sabines]

Preguntas:

- Calcular la absorción acústica total (A_T) del recinto en m² de área de absorción equivalente.
- ¿Qué elemento arquitectónico aporta la mayor contribución al control de la energía absorbida dentro del recinto?

Resolución:

Cálculo por componentes:

Paredes: $A_1 = 180 \cdot 0{,}04 = 7{,}20$ m^2

Cielorraso: $A_2 = 120 \cdot 0{,}65 = 78{,}00$ m^2

Piso: $A_3 = 120 \cdot 0{,}25 = 30{,}00$ m^2

Muro madera: $A_4 = 40 \cdot 0{,}10 = 4{,}00$ m^2

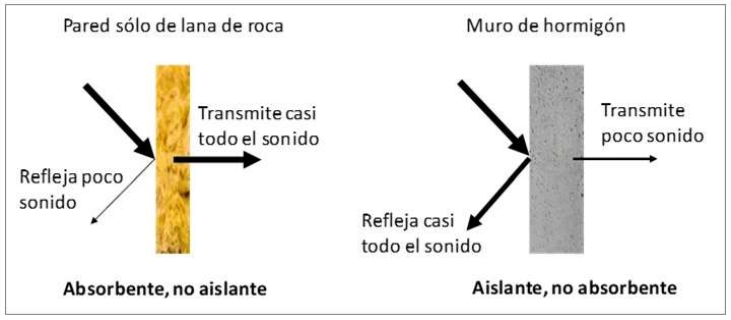
Ventana: $A_5 = 20 \cdot 0{,}05 = 1{,}00$ m^2

Absorción Total (A_T):

$$A_T = 7{,}20 + 78{,}00 + 30{,}00 + 4{,}00 + 1{,}00$$
$$= 120{,}20 \text{ m}^2 \text{ de absorción equivalente}$$

Conclusión teórica: El cielorraso acústico aporta 78 m^2 (casi el 65% de la absorción total) debido a su elevado coeficiente poroso ($\alpha = 0{,}65$), constituyendo el dispositivo principal para disipar energía acústica por rozamiento interno.

El Sonido en el Hecho Constructivo



N1 > N2 (Nivel de sonido)

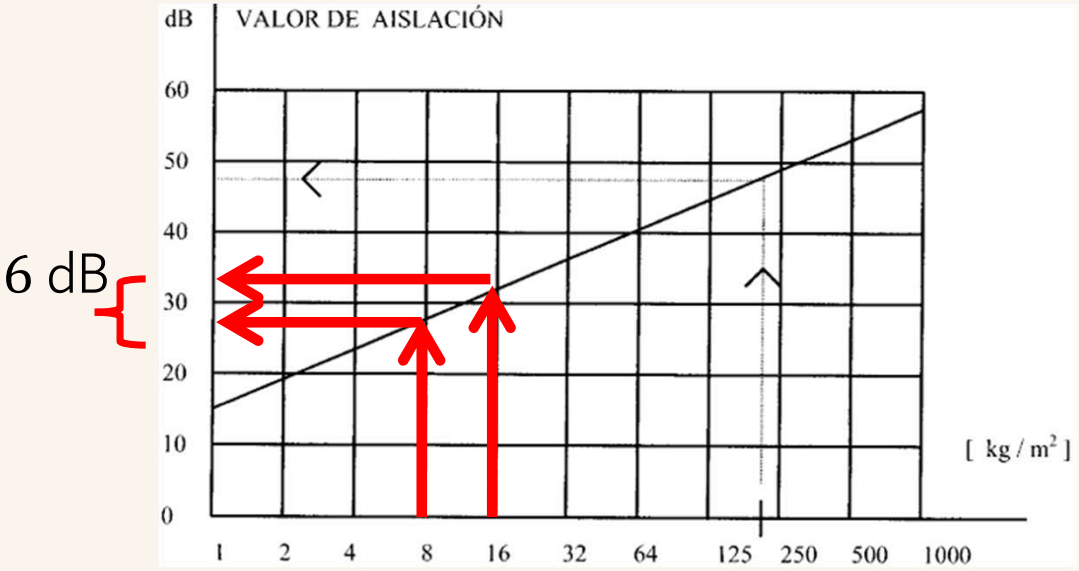
$$N_a = N_1 - N_2 \quad [d\beta]$$

Aislación con Distintos Materiales

Materiales Absorbentes vs. Materiales Aislantes:

- **Absorbentes (porosos/livianos):** Lana de vidrio, espumas sintéticas, placas acústicas. Presentan alta porosidad comunicada; **disminuyen la reverberación interna pero no aíslan el ruido** por sí solos.
- **Aislantes (pesados/estancos):** Hormigón, mampostería masiva, plomo, vidrio grueso. Tienen alta densidad superficial y no son porosos; **reflejan la onda para evitar su paso al recinto contiguo**.

El Sonido en el Hecho Constructivo



Aislamiento Simple (Paredes Monolíticas)

Principio: Cerramientos constitutivos de una sola capa rígida y pesada (ej. muro de ladrillos comunes o tabique de hormigón).

Límite de la Ley de Masas: La resistencia acústica depende casi exclusivamente del peso superficial ($\sigma = \gamma \cdot e$).

Desventaja constructiva: Para incrementar la aislación en solo 6 dB, es necesario duplicar el espesor o la masa de la pared, lo que genera estructuras excesivamente pesadas y poco eficientes en términos de carga y costo.

Ejercicio 4: Aislamiento acústico de un cerramiento simple mediante la Ley de Masas

Un estudio de grabación requiere aislar el ruido aéreo proveniente de una sala adyacente donde el nivel sonoro de emisión es $N_1 = 92$ dB. Se proyecta un tabique monolítico de hormigón armado de espesor $e = 0{,}10$ m.

Datos:

Nivel sonoro emisor (N_1): 92 dB
Espesor del hormigón (e): $0{,}10$ m
Peso específico del hormigón (γ): 2400 kg/m^3
Masa superficial (σ): $\sigma = \gamma \cdot e = 2400 \cdot 0{,}10 = 240$ kg/m^2

Lectura/Cálculo según gráfica de la Ley de Masas:

- Utilizando el gráfico de *"Valor de Aislación vs. kg/m²"* de la presentación: para una densidad superficial de 240 kg/m^2, el valor de aislación obtenido es aproximadamente $N_a \approx 48$ dB.

Preguntas:

- Determinar el nivel de sonido residual (N_2) en la sala receptora.
- Si para lograr un aislamiento 6 dB superior ($N_a = 54$ dB) se mantiene la solución de pared monolítica simple, ¿cuál debería ser el nuevo espesor del muro? Enuncie la limitación arquitectónica de este principio.

Resolución:

- Nivel sonoro receptor (N_2):
- $N_a = N_1 - N_2 \Longrightarrow N_2 = N_1 - N_a = 92$ dB $- 48$ dB $= 44$ dB
- Duplicación de masa (Ley de Masas para pared simple):
- Según el principio de aislamiento simple, para aumentar la aislación en 6 dB con una sola capa, se debe duplicar el peso superficial o el espesor.
- Nuevo espesor requerido: $e' = 2 \cdot 0{,}10$ m $= 0{,}20$ m.
- Nueva masa superficial: $\sigma' = 480$ kg/m^2.

Conclusión teórica: Duplicar el espesor implica duplicar la carga muerta sobre la estructura de la edificación y encarecer significativamente la obra, mostrando la ineficiencia del aislamiento simple masivo en comparación con los sistemas múltiples.