

Acustica e Illuminotecnica

Progettare l'ambiente acustico

Marco Frascarolo, ing, PHD

**Università degli Studi di Roma Tre
Dipartimento di Architettura**

Comfort acustico

Dipende dalle seguenti variabili:

- **Sorgenti di rumore interne / esterne**
- **Livello di isolamento con l'esterno**
- **Livello di isolamento tra gli ambienti interni**
- **Proprietà fonoassorbenti dei materiali di finitura**

Il suono: definizione

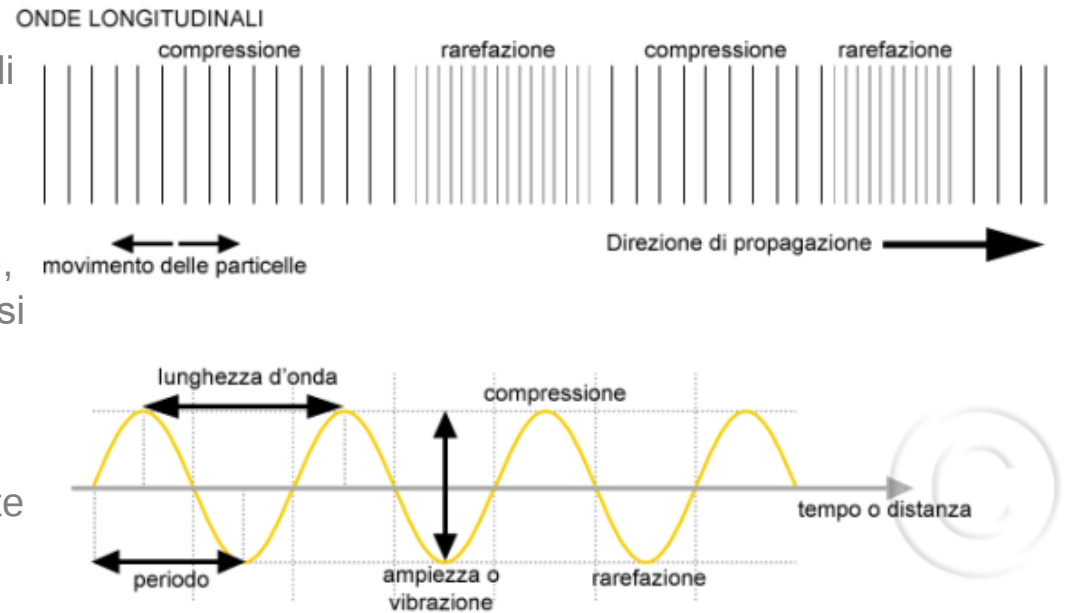
Il suono è un fenomeno determinato da rapide **variazioni di pressione**, prodotte in un mezzo elastico.

Si ha trasporto energetico, non trasporto di materia da un punto all'altro.

Esso richiede un **mezzo elastico** in cui propagarsi (non può propagarsi nel vuoto), che comprende non solo l'aria ma qualsiasi sostanza solida, liquida o gassosa.

Le onde sonore hanno una caratteristica particolare: le particelle di materia coinvolte nel fenomeno sonoro fluttuano intorno ad una posizione di equilibrio. Il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda, perciò si definiscono onde **longitudinali**.

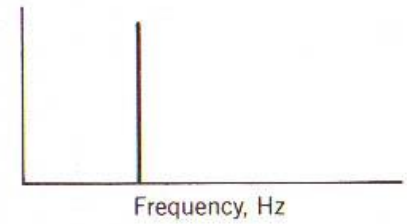
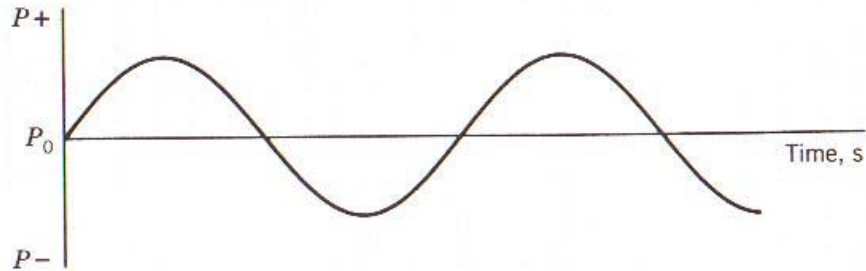
Il suono tuttavia può propagarsi anche **sotto altre forme**. Esse devono essere analizzate molto attentamente poiché potrebbero essere un problema nello studio dell'isolamento acustico.



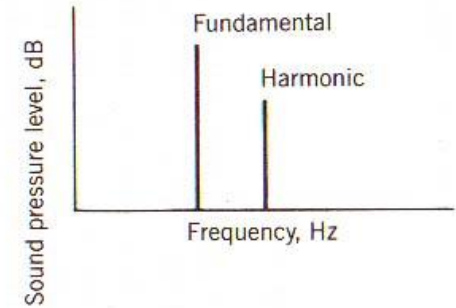
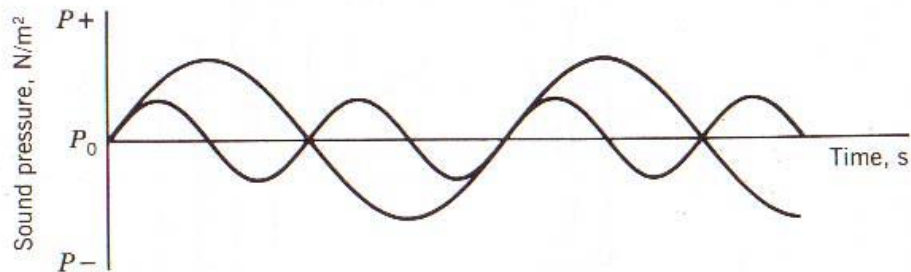
Il Sonographer @ 2014 <http://sonographer.wordpress.com>

Il suono

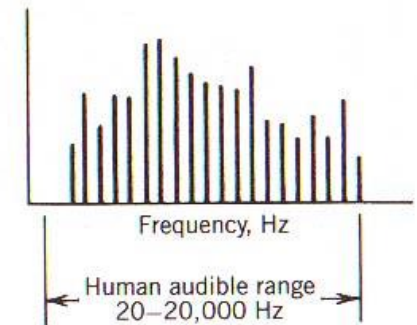
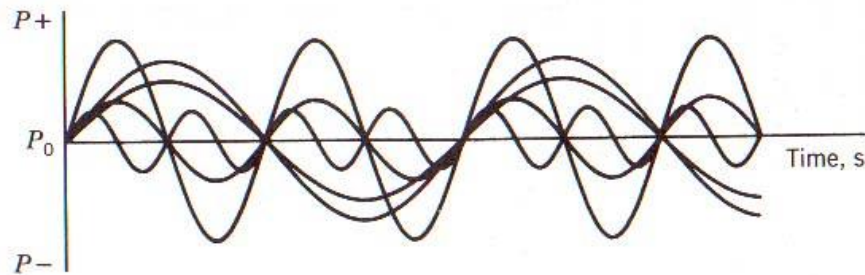
Pure tone



Musical tone

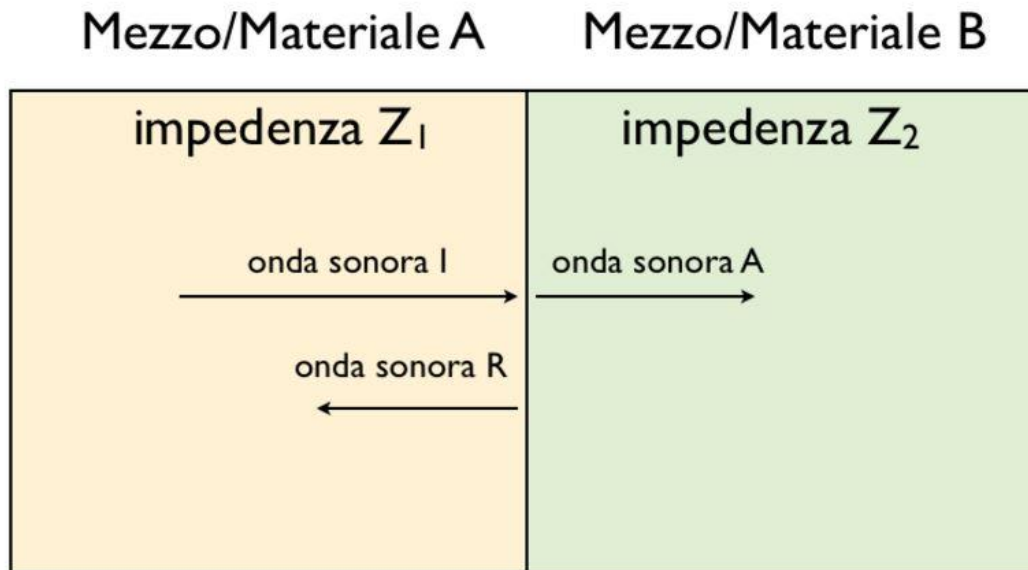


Common sounds
(music, speech,
noise)



Impedenza acustica

Rappresenta la resistenza espressa da un mezzo al passaggio dell'onda acustica. È particolarmente importante nei casi in cui l'onda sonora attraversa due mezzi o due materiali costituiti da densità, temperatura e materia differenti. Le differenti impedenze acustiche dei due materiali provocano una riflessione dell'onda acustica nel punto di confine tra i mezzi. La quantità di energia che viene riflessa dipende dalla differenza di impedenza: maggiore è la differenza, maggiore sarà la quantità di suono che viene riflessa e conseguentemente minore quella che riuscirà ad attraversare la barriera di divisione tra i due materiali.



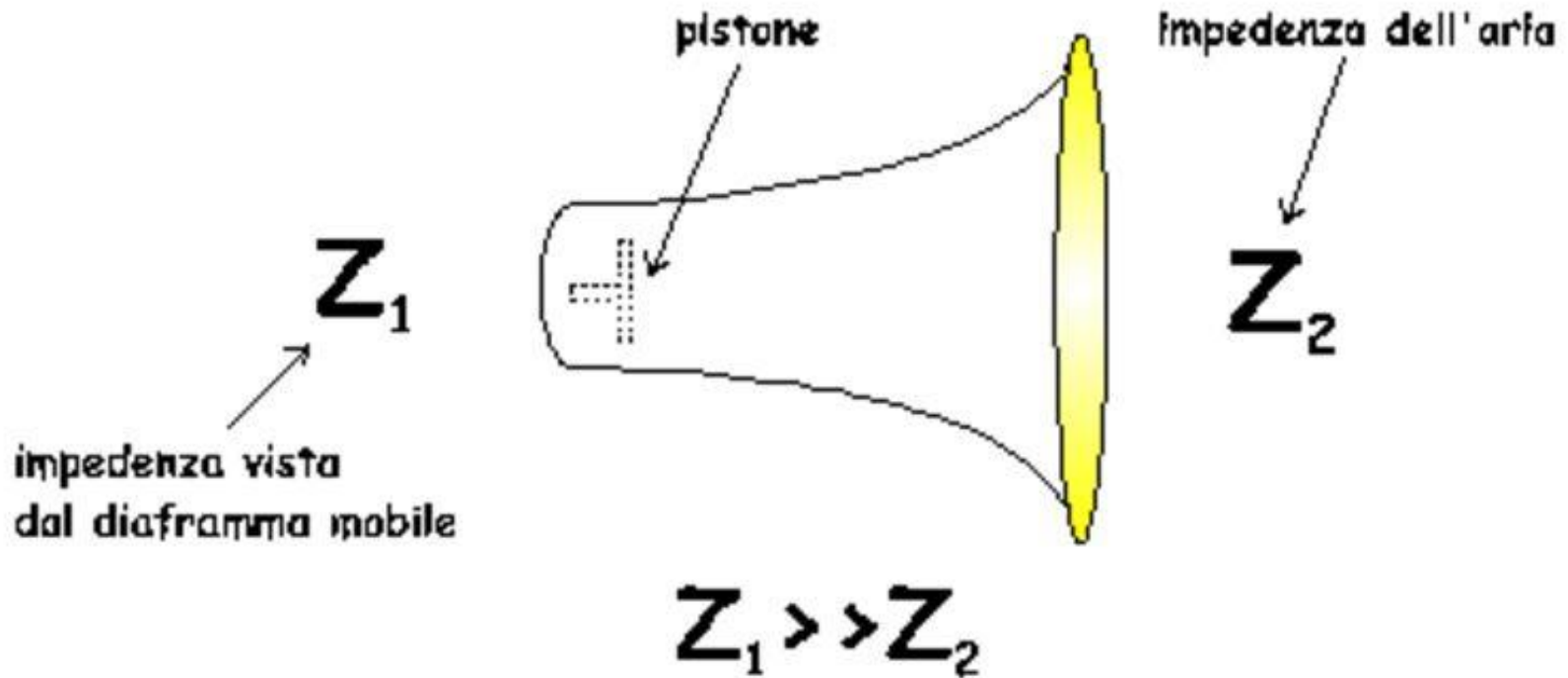
onda sonora I = onda sonora incidente

onda sonora R = onda sonora riflessa

onda sonora A = onda sonora assorbita

$I = R + A$ (per il principio di conservazione dell'energia)

Impedenza acustica



$$Z = \frac{\text{Pressione}}{\text{Velocità}} = \frac{P}{V}$$

Decibel e livello di pressione sonora

Intensità e potenze sonore associate ai fenomeni che l'orecchio umano può percepire hanno un'**ampia** dinamica:

- 1 pW/m² pico = 10⁻¹² (soglia dell'udibile) ÷ 1 W/m² (soglia del dolore)
- 20 µPa micro = 10⁻⁶ (soglia dell'udibile) ÷ 20 Pa (soglia del dolore)

Dall'analisi di questi aspetti percettivi, si nota che il campo di valori entro il quale la pressione sonora può variare risulta assai ampio, estendendosi su oltre sei (dodici) ordini di grandezza. La variazione di tali grandezze è rappresentata in **scala logaritmica** anzichè su scala lineare perché:

- Permette di evitare l'oggettiva difficoltà nel trattare un così vasto intervallo di valori, dai molto piccoli ai molto grandi;
- L'enorme capacità dinamica dell'apparato uditivo suggerisce una risposta organizzata più in termini logaritmici che non lineari.

L'introduzione della scala logaritmica consente di confrontare i valori delle grandezze in esame con valori convenzionali della stessa grandezza assunti come riferimento. Si introduce il concetto di **livello** della grandezza in esame, ovvero il livello rispetto al valore di riferimento della stessa grandezza. Il **decibel (dB)** esprime appunto questo rapporto, e pur rappresentando una quantità adimensionale, nella pratica comune è ormai trattato come una unità di misura vera e propria.

Livello di Pressione Sonora

$$L_p = 20 \log_{10} P / P_0 \text{ (dB)}$$

$P_0 = 20 \text{ µPa}$ corrispondente al valore della soglia normale di udibilità a 1000 Hz

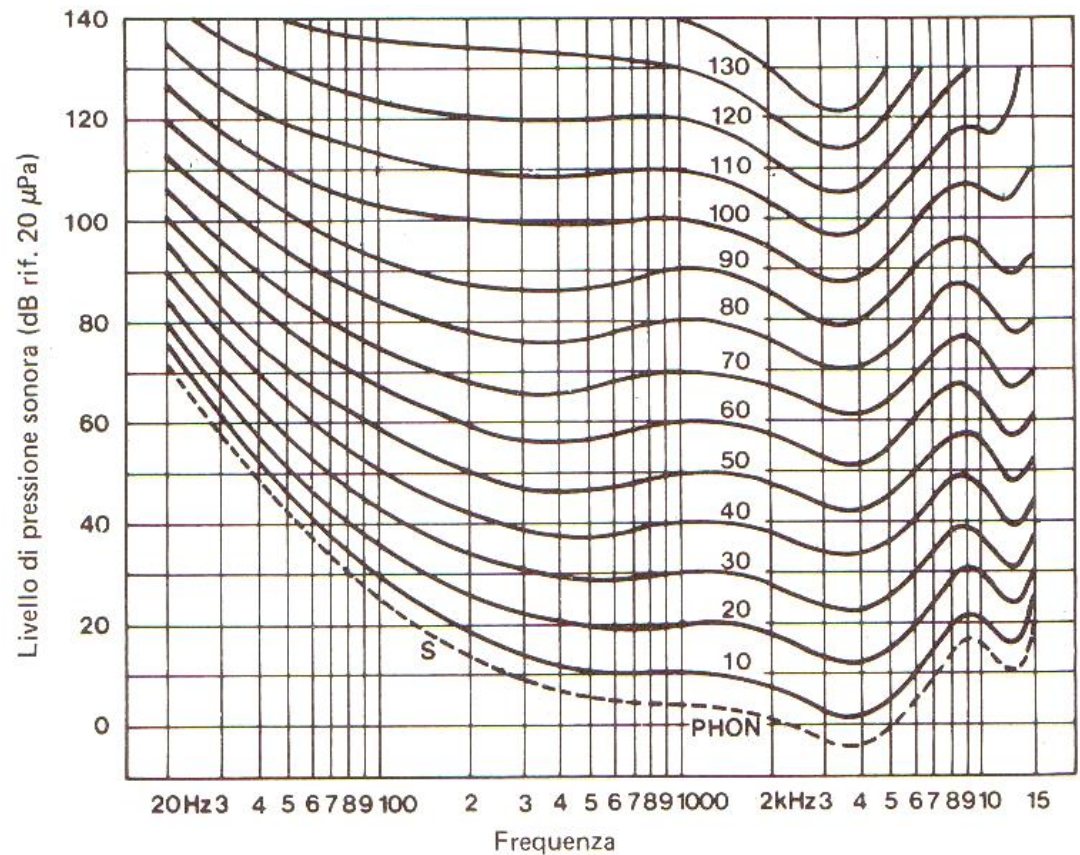
Audiogramma normale: curve ISO R-226

La **risposta del nostro sistema auditivo** non è uguale a tutte le frequenze. Due suoni con identica intensità e diverse frequenze possono generare un livello di sensazione sonora assai differenti.

Le **curve isofoniche** rappresentano il livello di pressione sonora che deve avere un suono alle varie frequenze per dare la stessa sensazione. Si determinano sperimentalmente alternando l'ascolto di un tono puro ad una certa frequenza e un altro tono puro alla frequenza di riferimento (1000 Hz).

Soglia di udibilità: minima intensità necessaria perché un suono sia udito.

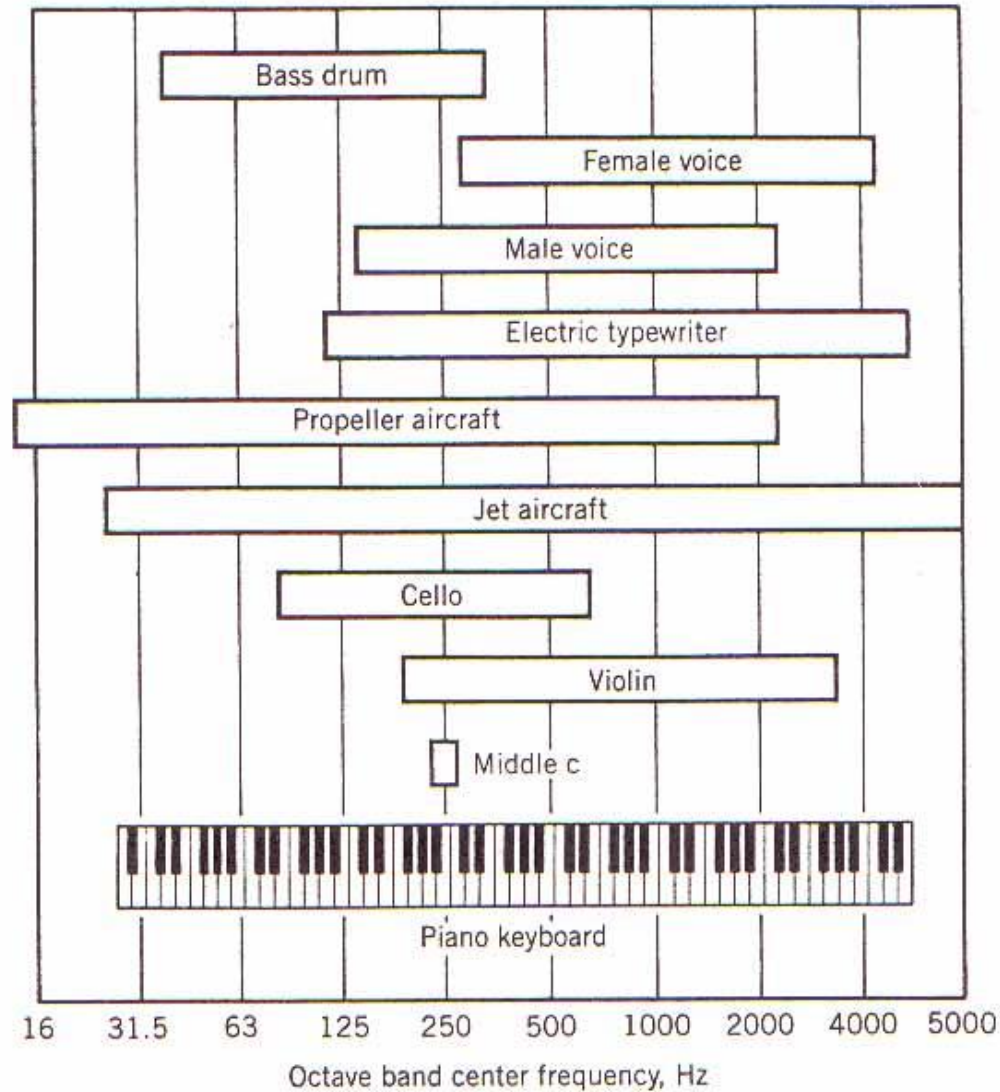
Soglia del dolore: oltre cui il suono ha effetti dannosi anche per brevi esposizioni.



Intensità e livelli di pressione sonora

Intensità acustica di vari rumori		
Sorgente	Intensità	Livello (dB)
Soglia di udibilità	1	0
Respiro normale	10	10 (appena udibile)
Stormire di foglie	10^2	20
Voce bisbigliata	10^3	30 (molto quieto)
Ristorante tranquillo	10^4	40
Ufficio silenzioso	10^5	50
Conversazione tra due persone	10^6	60
Interno di ufficio rumoroso	10^7	70 (disturbante)
Traffico stradale rumoroso	10^8	80
Autotreno (a 15 m)	10^9	90 (pericolo per esposi-
Cascate del Niagara	10^9	90 zioni prolungate)
Metropolitana	10^{10}	100
Complesso rock	10^{11}	110
Martello pneumatico	10^{12}	120 (soglia del dolore)
Fuoco di mitragliatrice	10^{13}	130
Decollo di un piccolo aereo	10^{14}	140
Galleria aerodinamica	10^{15}	150
Decollo di un grande aereo	10^{17}	170
Decollo del missile Saturno	10^{19}	190

Estensione in frequenza di alcuni suoni



Curve di ponderazione

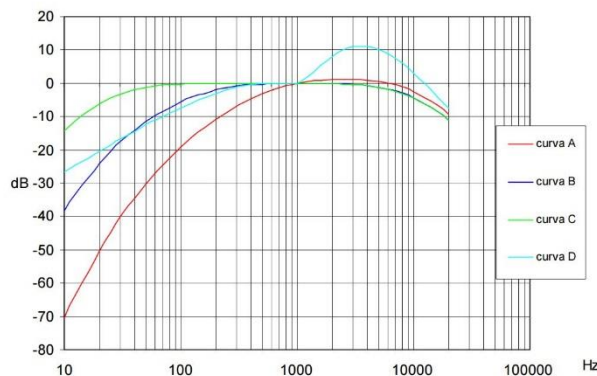
Livello sonoro ponderato in curva A (dBA)

Per rappresentare al meglio la risposta umana al suono è necessario compensare strumentalmente il fatto che l'orecchio sente meglio alle alte frequenze piuttosto che alle basse. L'operazione di ponderazione consiste nell'applicare dei coefficienti correttivi, frequenza per frequenza, ai decibel lineari (ovvero privi di ponderazione) rilevati col fonometro in modo da ottenere l'effettiva sensazione umana.

Esistono varie curve da applicare ai vari casi secondo le indicazioni delle normative vigenti:

- **curva A** (per livelli sotto i 60 dB) dB(A)
- **curva B** (tra 60 e 80 dB)
- **curva C** (oltre 80 dB)
- **curva D** (per rumori molto forti, es. aerei)

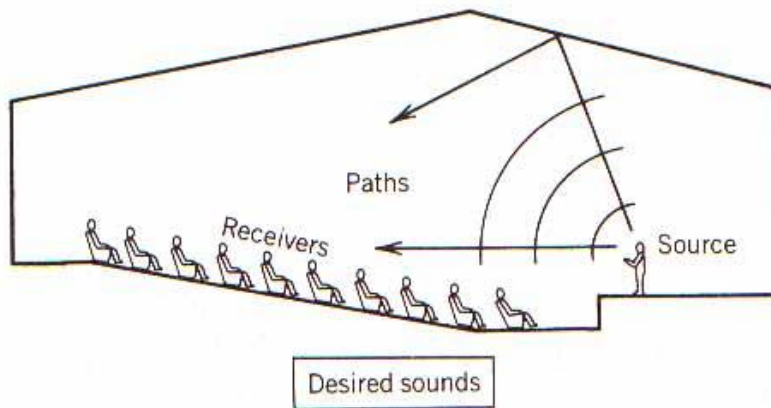
Si definiscono le misure in dB(A), dB(C), la curva B e la curva D non sono prese in considerazione dalla legge



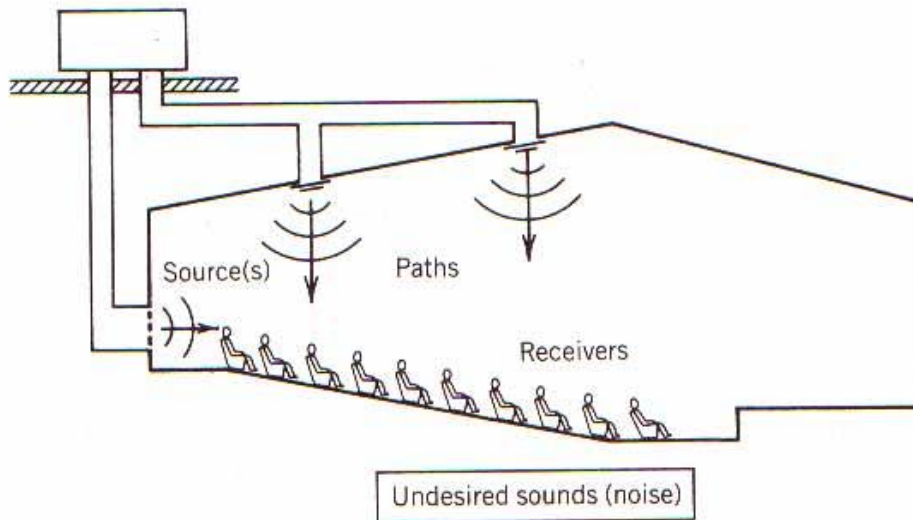
Tab. A.4
Curve di risposta del misuratore di livello sonoro normalizzato

Frequenza (Hz)	Curva A (dB A)	Curva B (dB B)	Curva C (dB C)
10	-70,4	-38	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,5	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	0,6	0	0
1600	1,0	0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

(*) I valori in tabella sono quelli delle attenuazioni rispetto ad una risposta indipendente dalla frequenza (scala dei livelli di pressione: dB lin), secondo la raccomandazione IEC n. 179.



Acustica dei suoni desiderati



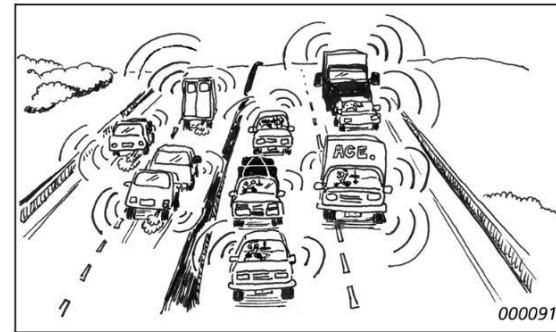
Acustica dei suoni non desiderati

Tipi di sorgenti

Sorgente puntiforme



Sorgente lineare



Sorgente areale



Direttività delle sorgenti

Il campo acustico generato da una sorgente sonora reale è caratterizzato da una emissione di energia sonora diversa secondo le varie direzioni.

La direttività è funzione della frequenza; in generale le basse frequenze possono essere sempre approssimate a suoni omnidirezionali, mentre le alte frequenze hanno direttività più accentuata e quindi non trascurabile. Ciò significa che un suono in bassa frequenza disperde più rapidamente la propria energia, e quindi perde maggiormente volume sulla distanza, mentre un suono acuto a parità di distanza ha un volume più alto.

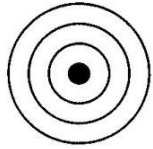
Fattore di direttività Q : rapporto tra intensità reale nella direzione Θ (I_{reale}) e l'intensità sonora I_{ideale} che avrebbe il campo acustico in quel punto se la sorgente fosse ideale, ovvero omnidirezionale con fronti d'onda sferici.

$$Q = I_{\text{reale}} / I_{\text{ideale}}$$

Indice di direttività D :

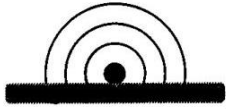
$$D = 10 \log Q \text{ (dB)}$$

Direttività delle sorgenti



$$Q = 1$$
$$D = 0 \text{ dB}$$

Sorgente puntiforme sferica
 $Q = 1$



$$Q = 2$$
$$D = 3 \text{ dB}$$

Sorgente puntiforme sferica posta su un
piano perfettamente riflettente
 $Q = 2$

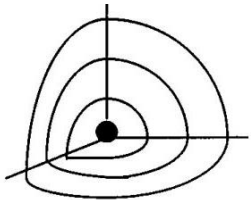
Incremento di **3 dB**
rispetto al caso
omnidirezionale



$$Q = 4$$
$$D = 6 \text{ dB}$$

Sorgente puntiforme sferica posta in un
angolo tra due superfici riflettenti
 $Q = 4$

Incremento di **6 dB**
rispetto al caso
omnidirezionale



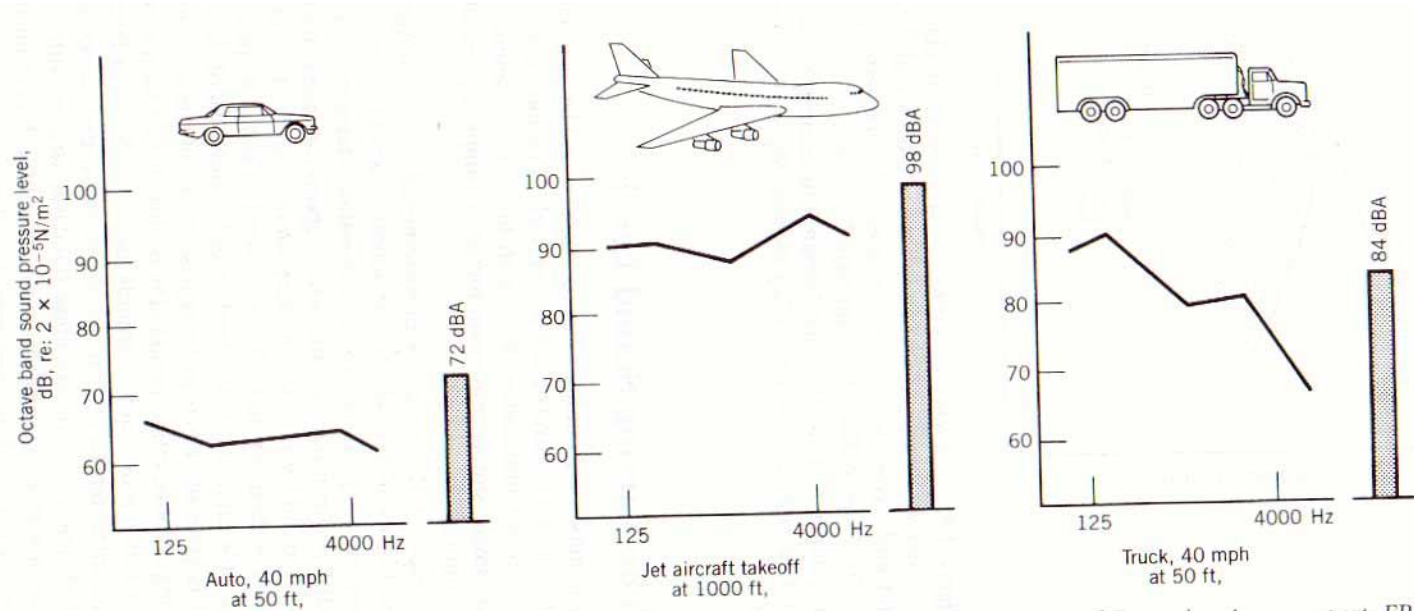
$$Q = 8$$
$$D = 9 \text{ dB}$$

Sorgente puntiforme sferica posta in un
angolo tra tre superfici riflettenti
 $Q = 8$

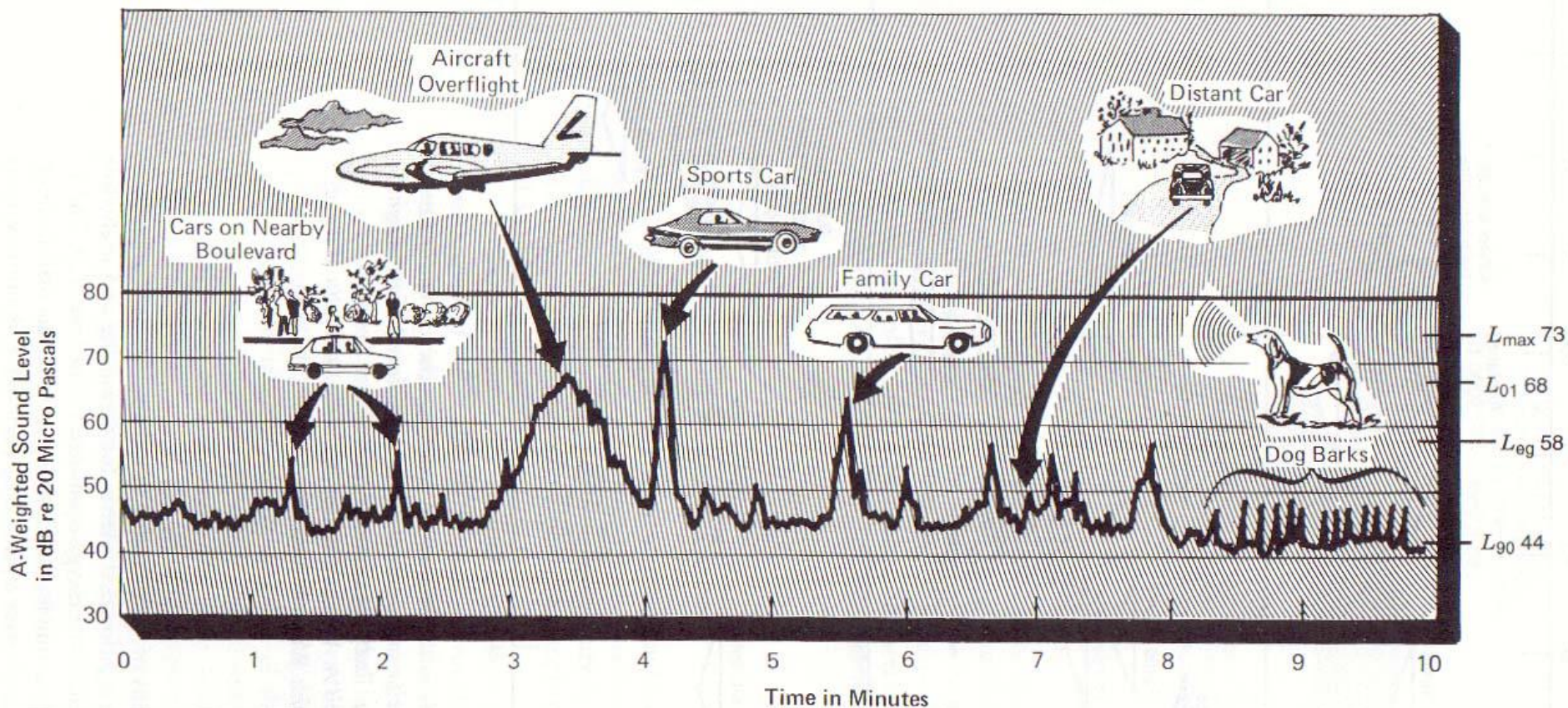
Incremento di **9 dB**
rispetto al caso
omnidirezionale

Livelli sonori di alcune fonti di rumore tipiche

- Andamento del Livello con la frequenza
- Livello ponderato in dbA (rif. Isofonica 40 dB): valore unico che esprime l'effetto disturbante del rumore



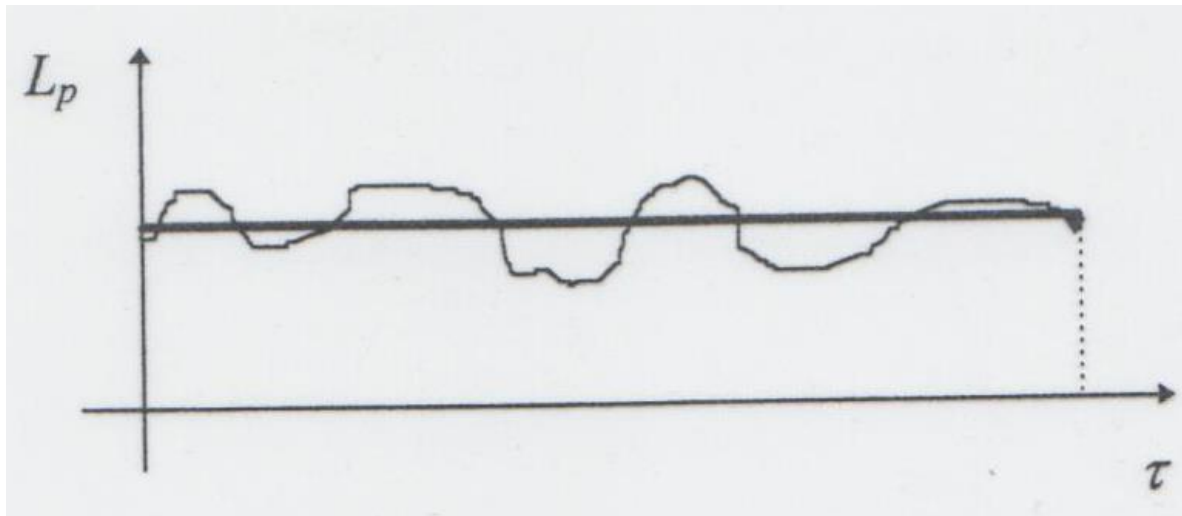
Andamento nel tempo del suono in ambiente urbano



Livello equivalente continuo

Se un soggetto è esposto per un certo tempo ad un rumore variabile nel tempo il disturbo che ne riceve dipende sia dal livello sia dal tempo di esposizione (dose di rumore). Il livello equivalente continuo è un rumore continuo che agisce **nello stesso tempo** del rumore reale ed è equivalente a quest'ultimo dal punto di vista energetico, cioè trasporta nello stesso tempo la **stessa energia**.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{P_A(t)}{P_0} \right]^2 \cdot dt \right)$$



Classificazione acustica del territorio

Con il termine di classificazione o zonizzazione acustica del territorio si intende indicare quella procedura che porta a differenziare il territorio in **sei classi omogenee** sulla base dei principali usi urbanistici consentiti, siano essi già realizzati o soltanto in previsione

Ad ogni classe omogenea individuata competono, sulla base delle indicazioni statali, specifici **limiti acustici** (DPCM 14/11/97 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore").

Valori massimi di rumore ammissibili L_{Aeq} dB(A)

Classe di area territoriale	Tempi di riferimento	
	Diurno 6-22	Notturmo 22-6
I- Aree particolarmente protette ospedali, scuole, parchi	50	40
II- Aree residenziali	55	45
III - Aree miste uffici, negozi	60	50
IV - Aree ad intensa attività umana centri storici, grosse arterie stradali	65	55
V - Aree prevalentemente industriali	70	60
VI - Aree industriali	70	70

Modalità di trasmissione del rumore tra due ambienti limitrofi

La trasmissione del suono negli edifici avviene attraverso due modalità:

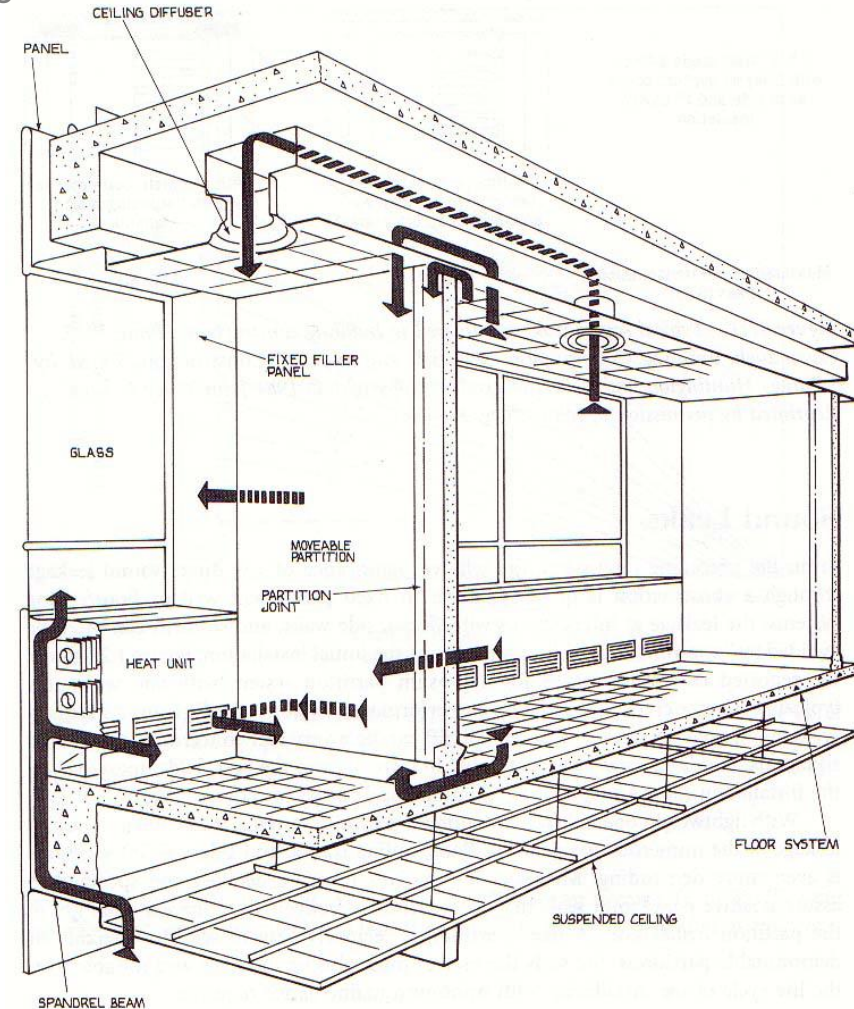
- **Trasmissione per via aerea:** rumore che si propaga nell'ambiente disturbante attraverso le pareti divisorie e arriva nell'ambiente disturbato.
- **Trasmissione per via strutturale:** rumore che si propaga dall'ambiente disturbante all'ambiente disturbato attraverso vibrazioni delle strutture.

Per proteggere un ambiente dal disturbo sonoro di un ambiente confinante o dell'esterno possiamo applicare due diverse strategie:

- **Difesa attiva:** si interviene direttamente sulla sorgente, ad esempio abbassandone il volume
- **Difesa passiva:** si interviene sulla propagazione del suono

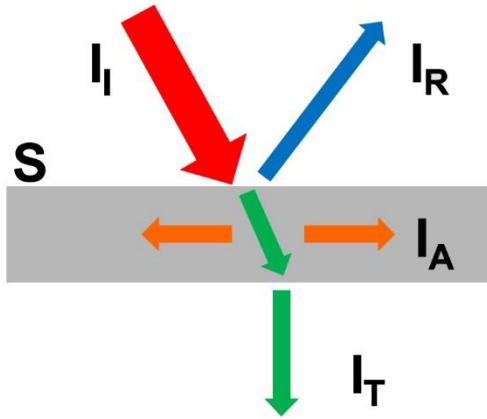


Fonoisolamento



Assorbimento, riflessione, trasmissione

L'energia sonora che incide sulla superficie S si divide in tre componenti: una parte viene riflessa dalla superficie, una parte viene assorbita ed una parte trasmessa oltre il materiale/pacchetto



Coefficiente di assorbimento

$$\alpha = I_A/I_i$$

Coefficiente di trasmissione

$$\tau = I_T/I_i$$

Coefficiente di riflessione

$$\rho = I_R/I_i$$

Per il principio di conservazione dell'energia le tre componenti in cui si divide I_i sommate dovranno nuovamente dare I_i

$$I_A + I_T + I_R = I_i$$

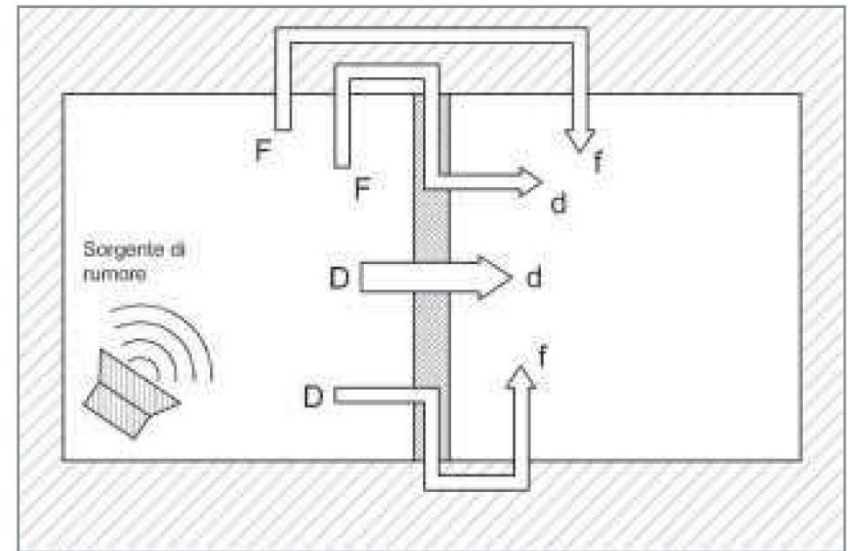
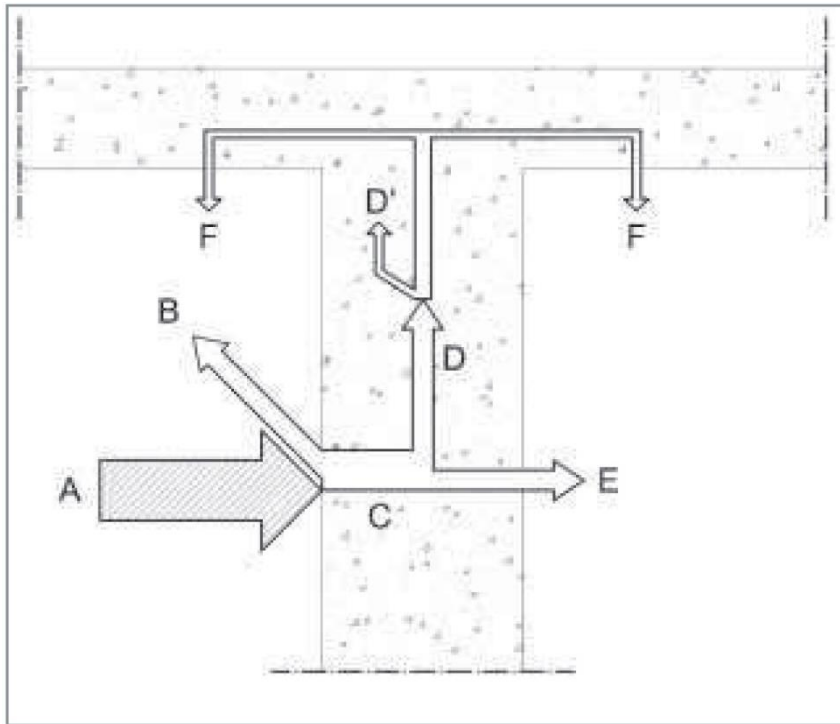
$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

Rumori aerei

I suoni si trasmettono nell'aria sotto forma di onde di pressione. Quando l'onda sonora incide su un divisorio(A), parte dell' energia viene riflessa (B) parte viene assorbita (C).

Dell'energia assorbita una parte si propagherà lateralmente all'interno del divisorio (D) (e parzialmente sarà trasformata in calore (D')), altra attraverserà la partizione (E) e, mettendo in vibrazione il lato opposto della parete, verrà ritrasmessa all'esterno.

Inoltre dell' energia che si propaga lateralmente quella parte che non si è trasformata in calore (F) raggiungerà le partizioni rigidamente collegate alla struttura in esame e, ponendole in vibrazione, verrà reirradiata negli ambienti circostanti.



Sopra sono raffigurati il **percorso diretto** (Dd) e i tre **percorsi laterali** (Ff, Fd, Df):

D: elemento divisorio lato locale sorgente

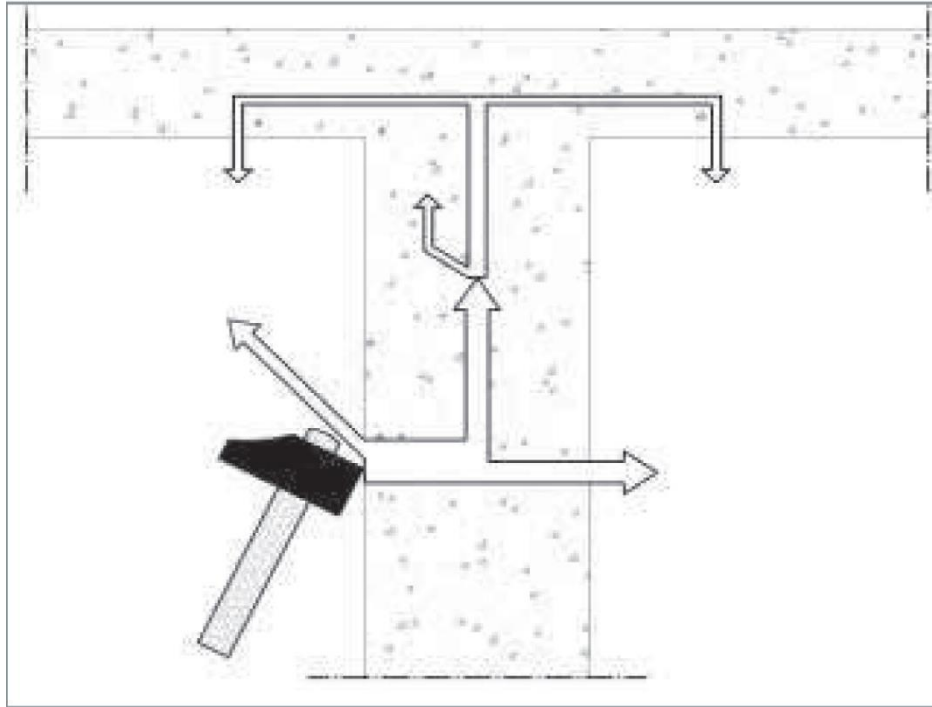
d: elemento divisorio lato locale ricevente

F: struttura laterale lato locale sorgente

f: struttura laterale lato locale ricevente

Rumori impattivi

Anche i rumori di origine impattiva (calpestio, spostamento di mobili, etc.) si propagano all'interno delle strutture con i medesimi meccanismi dei rumori aerei. La differenza sta nel fatto che la struttura, in questo caso, viene **messa in vibrazione dall'impatto** con un corpo solido e non da un rumore aereo.



Potere fonoisolante di una parete

È definito come la **capacità di un ostacolo di impedire la trasmissione del suono**. La quantità di suono trasmesso oltre l'ostacolo sarà inversamente proporzionale al potere fonoisolante dell'elemento.

In un ristretto intervallo delle frequenze centrali del campo **100-3150 Hz** è in generale prevedere il valore del potere fonoisolante R utilizzando la **legge di massa**.

$$R = 10 \log_{10} (W_i / W_t) = 20 \log_{10} f M - c$$

W_i potenza sonora incidente sulla parete

W_t potenza trasmessa dalla parete

f frequenza dell'onda sonora incidente

M massa della parete

c costante che dipende dalle modalità di incidenza dell'onda sulla parete, vale:

42,3 per incidenza normale

48 per incidenza diffusa

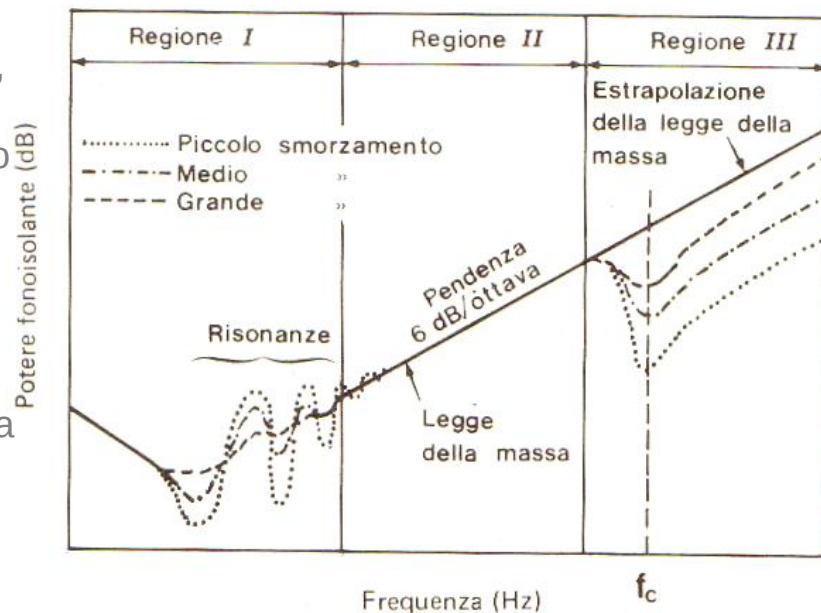
Legge della massa

Si distinguono tre distinti campi di frequenze nei quali la trasmissione sonora è determinata da fattori diversi.

Alle **basse frequenze**, le onde sonore mettono in **risonanza** il materiale, per cui la parete inizia a vibrare, riducendo drasticamente il potere fonoisolante della stessa. Per le normali pareti da costruzione il fenomeno si ha per frequenze più basse delle udibili. Acquista importanza per pareti sottili e molto rigide, per i quali diventa facilmente avvertibile.

Al di sopra di tale limite la massa superficiale della parete assume l'effetto preponderante e vale pertanto la relazione sopra riportata.

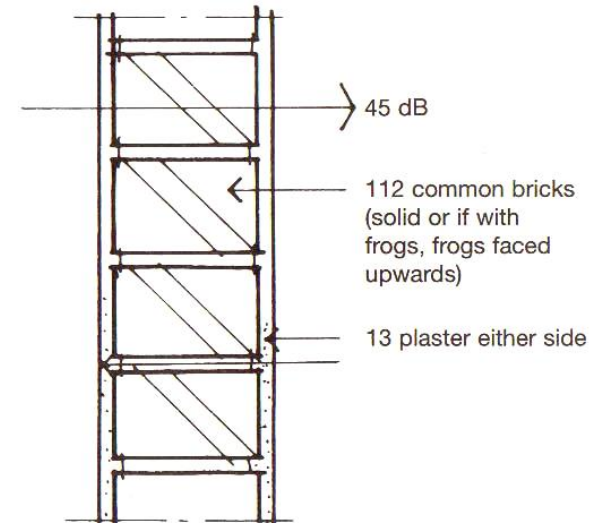
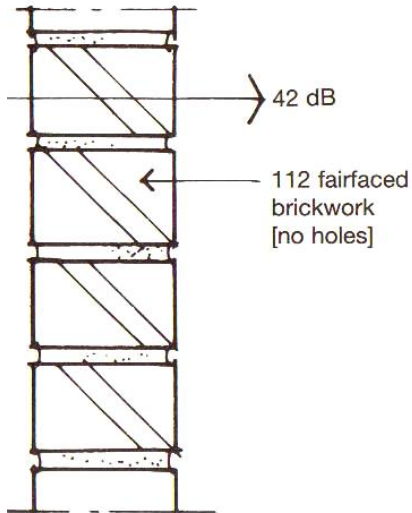
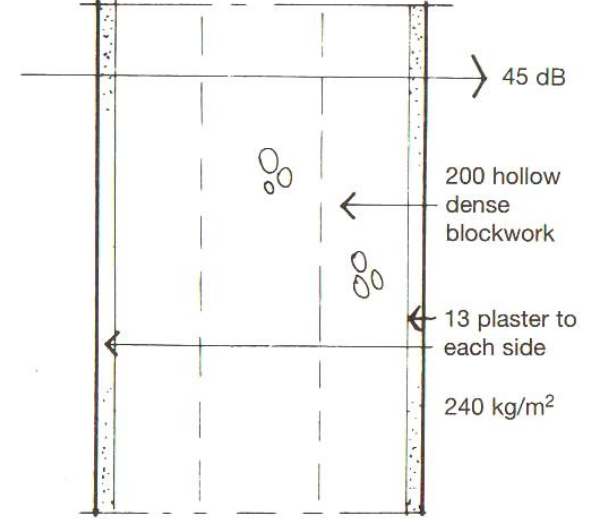
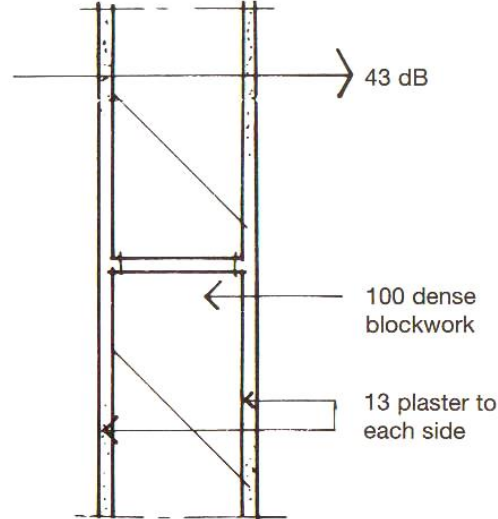
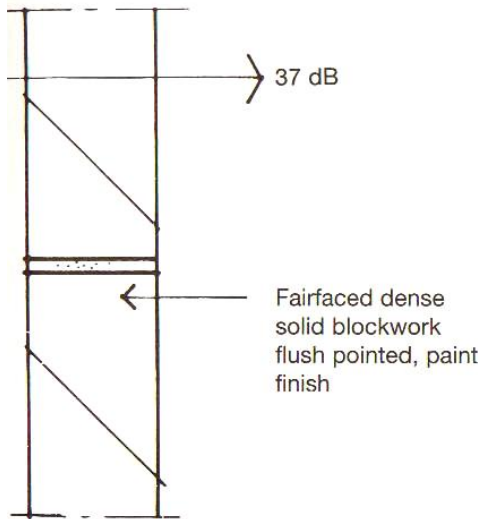
Nella zona delle **alte frequenze**, si verifica l'effetto di **coincidenza**. In corrispondenza di un'onda sonora avente una determinata inclinazione, per quell'angolo di incidenza il divisorio presenta una lunghezza d'onda identica a quella del suono, con la conseguenza che per quella frequenza (frequenza di coincidenza f_c , dipendente dalle proprietà del divisorio) si ha una consistente perdita di potere fonoisolante del mezzo. A destra di tale valore la legge della massa è ancora valida ma si considerano coefficienti peggiorativi.



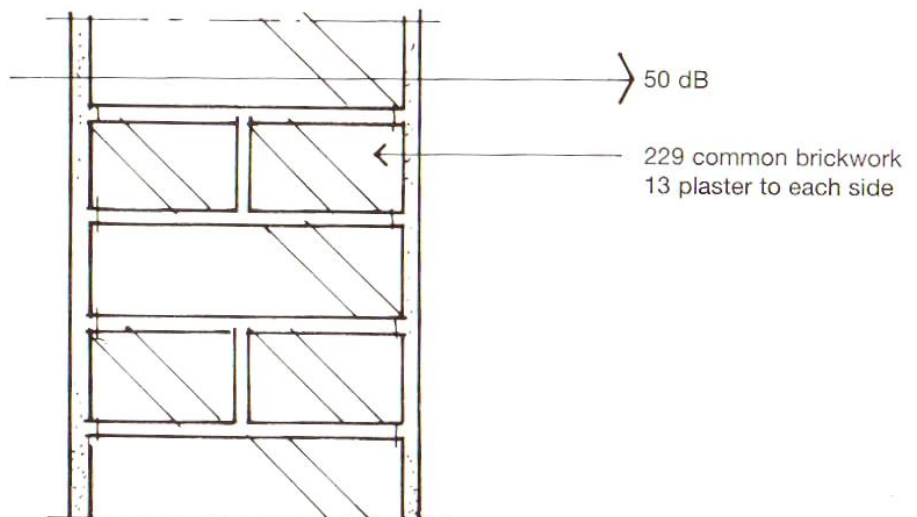
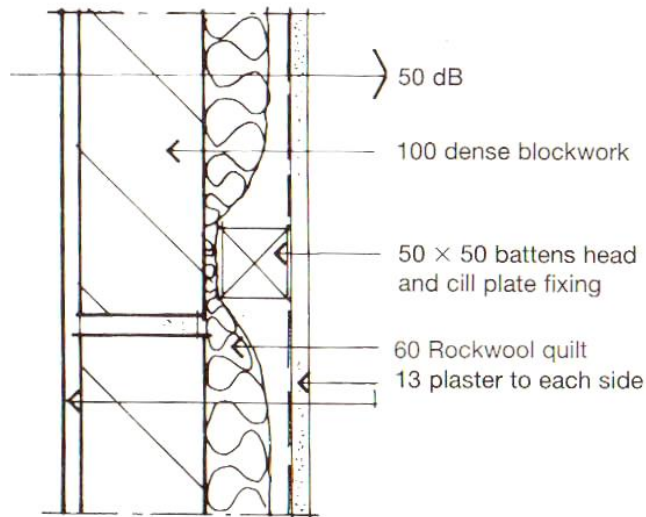
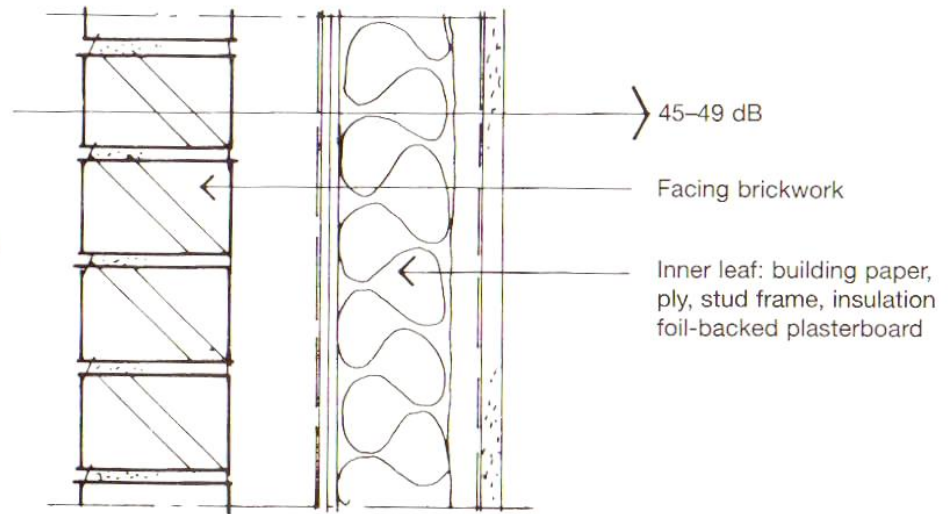
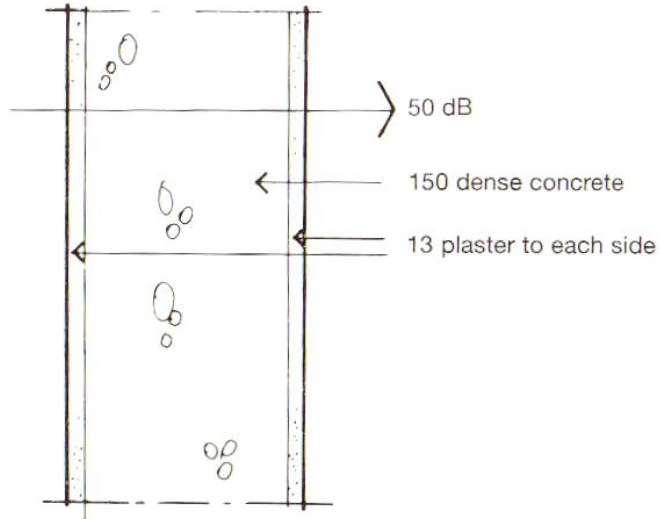
Potere fonoisolante di una parete in funzione della frequenza: si distinguono tre regioni:

- I) bassa frequenza, con varie risonanze;
- II) media frequenza, ove vale la legge della massa;
- III) alta frequenza, superiore alla frequenza critica f_c , ove il potere fonoisolante è sempre inferiore a quello voluto dalla legge della massa. (da L. Beranek).

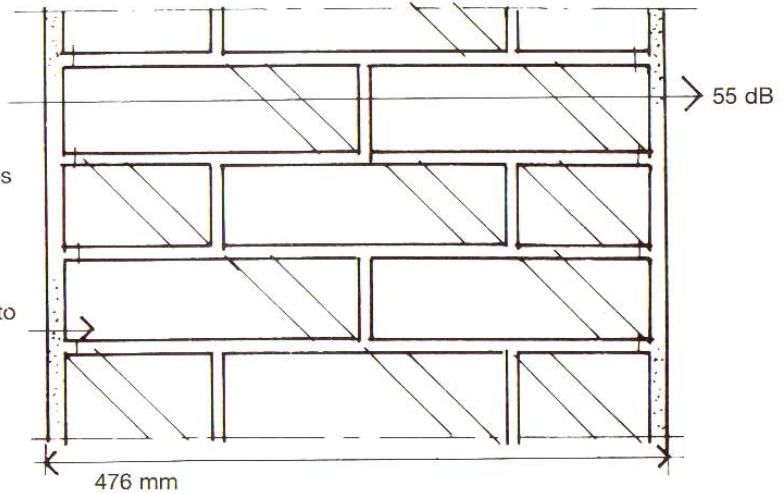
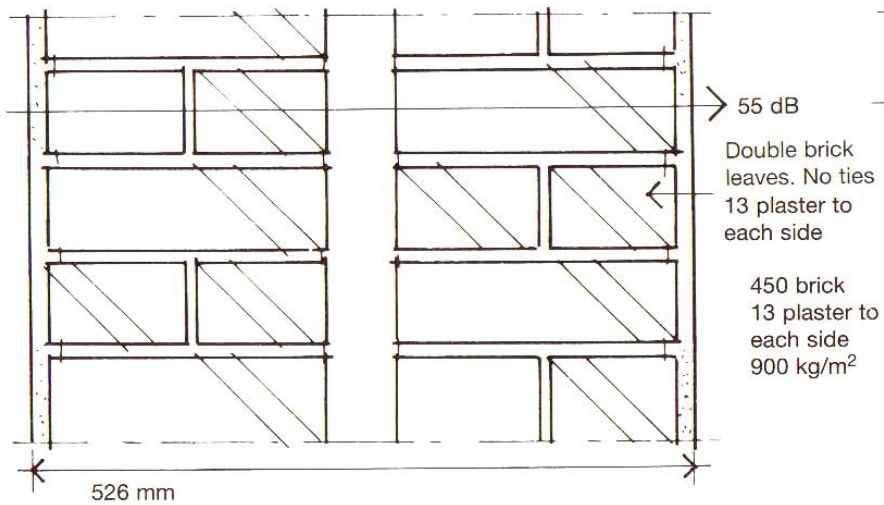
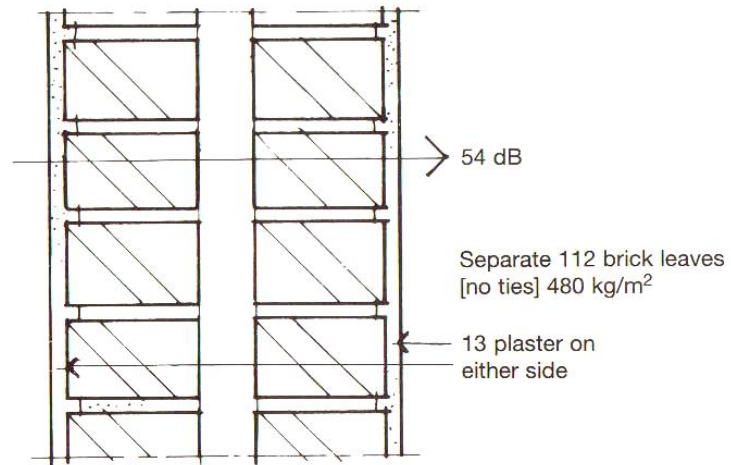
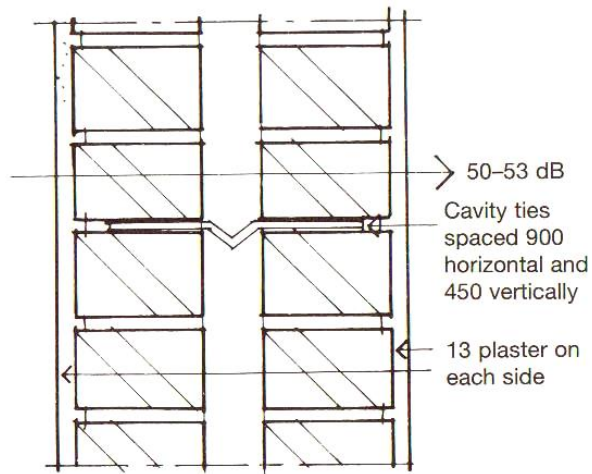
Potere fonoisolante di pareti tipo



Potere fonoisolante di pareti tipo



Potere fonoisolante di pareti tipo



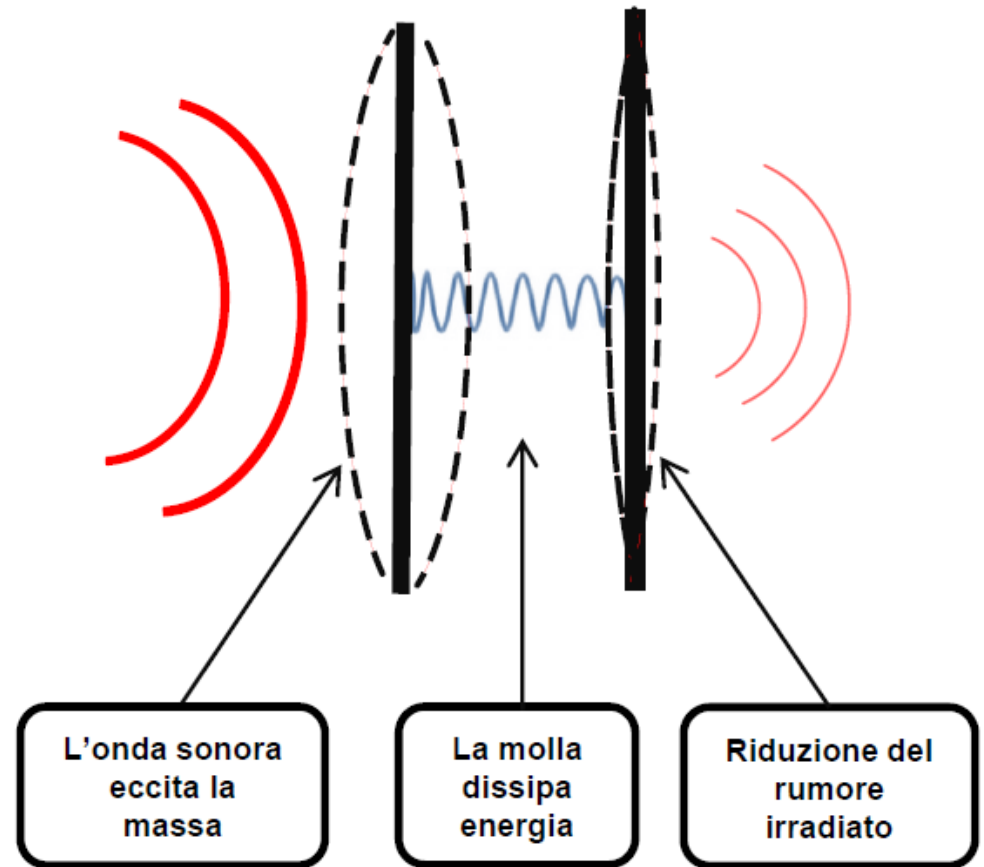
Criteri generali validi in acustici edilizia - pareti

Se dall'analisi in frequenza realizzata in situ con l'aiuto di un fonometro, si verifica che i livelli di pressione sonora sono alti in corrispondenza delle **basse frequenze**, è probabile che il suono si trasmetta nell'ambiente ricevente attraverso la **struttura**.

Se invece sono alte le componenti delle **alte frequenze** è probabile che all'interno della parete ci siano **fori o discontinuità** (montaggio infissi, rinzafo mattoni, scatole porta impianti, cassonetti avvolgibili, fori per areazione cucine, etc..).

In acustica **la corretta messa in opera** delle soluzioni progettuali è fondamentale per il raggiungimento dei requisiti di progetto. Le **prestazioni dichiarate** dai produttori devono essere cautelativamente ridotte di un 20%, poichè i valori dichiarati a seguito di prove di laboratorio, seppur certificate, assai difficilmente saranno riprodotti in cantiere.

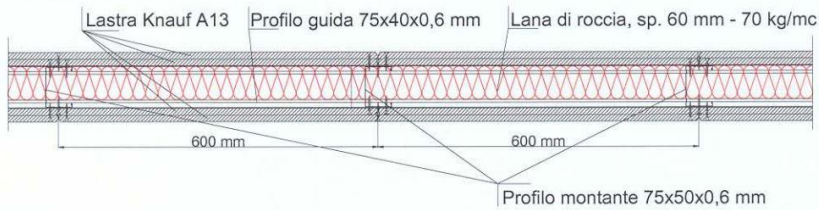
È sempre meglio privilegiare pacchetti sandwich (**massa – molla – massa**) a singoli elementi interposti. La parete avrà un comportamento differenziato su tutto lo spettro.



Isolamento acustico di pareti

Parete a secco

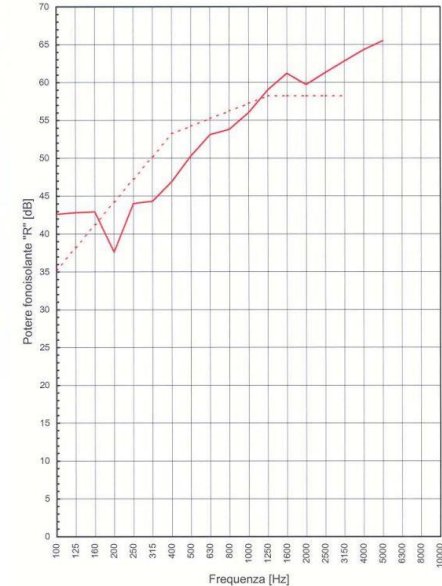
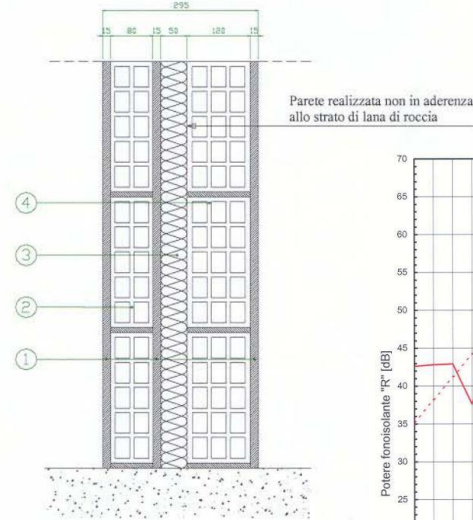
$R_W = 55 \text{ dB}$



Parete in laterizio

$R_W = 54 \text{ dB}$

Simbolo	Descrizione
1	Strato di intonaco tradizionale a base di malta cementizia, spessore 15 mm
2	Muratura di tramezze in laterizio formato 8x25x25, spessore 80 mm
3	Strato di pannelli in lana di roccia "ROCKWOOL 225", spessore 50 mm e densità 70 kg/m ³
4	Muratura di tramezze in laterizio formato 12x25x25, spessore 120 mm



Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico

ROCKWOOL - ACOUSTIC 225 PLUS

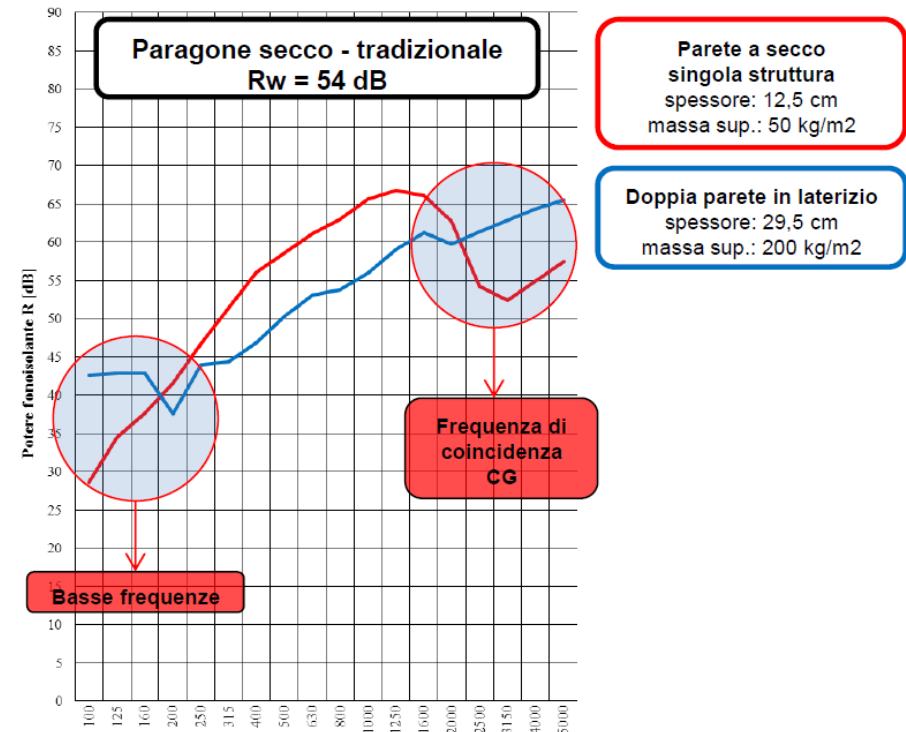
Pannello rigido in lana di roccia non rivestito a media densità, per l'isolamento termico e acustico di pareti divisorie e perimetrali leggere (tecnologia a secco) e massive.

- Ottime prestazioni termiche
- Ottime proprietà acustiche fonoisolanti grazie alla struttura a celle aperte della lana di roccia.
- La fibra minerale del pannello è incombustibile e contribuisce ad incrementare le prestazioni di resistenza al fuoco dell'elemento costruttivo in cui è installato.
- Stabilità dimensionale: il pannello non subisce variazioni dimensionali al variare delle condizioni igrometriche dell'ambiente.



DATI TECNICI

Classe di reazione al fuoco	A1	UNI EN 13501-1
Coefficiente di resistenza alla diffusione di vapore acqueo	$\mu = 1$	UNI EN 13162
Calore specifico	$C_p = 1030 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$	UNI EN 12524
Conducibilità termica dichiarata	$\lambda_D = 0,033 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	UNI EN 12667, 12939
Densità nominale	$\rho_a = 70 \text{ kg/m}^3$	UNI EN 1602
Coefficiente di dilatazione termica lineare	$2 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$	
Temperatura di fusione (lana di roccia)	$t_f > 1,000^\circ\text{C}$	

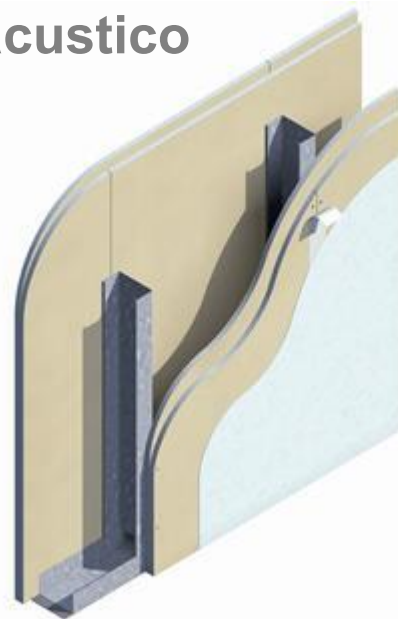


Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico

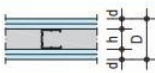
KNAUF - SILENTBOARD

Lastra in cartongesso rivestito, con nucleo in gesso maggiorato. La massa è concentrata, per questo si raggiunge un potere fonoisolante molto elevato.

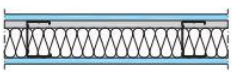
Utilizzo idoneo per parete, contropareti e controsoffitti realizzati con sistemi a secco.



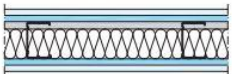
Dati tecnici

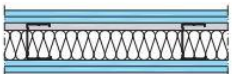
Sistema Knauf	Spessore lastre per ogni lato della parete	Peso senza strato isolante	Spessore Parete	Profilo Knauf Profilo C	Insonorizzazione
	d mm	ca. kg/m²	D mm	h mm	Strato isolante ²⁾ Potere fonoisolante $R_{w,R}^{1)}$ dB Spessore min. mm

W111 Parete con profili Knauf

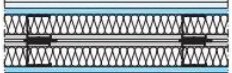
	12,5 Silentboard	39	75	50	40	54
			100	75	60	57
			125	100	80	58

W112 Parete con profili Knauf

	12,5 Silentboard + 12,5 Diamant	65	100	50	40	63
			125	75	60	64
			150	100	80	65

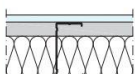
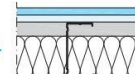
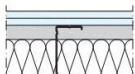
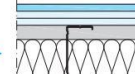
	2x 12,5 Silentboard	75	100	50	40	65
			125	75	60	66
			150	100	80	67

W115 Parete con profili Knauf

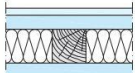
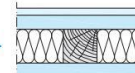
	12,5 Silentboard + 12,5 Diamant	67	155	2x 50	2x 40	71
--	---------------------------------	----	-----	-------	-------	----

Miglioramento del potere fonoisolante di pareti esistenti con Knauf Silentboard

Misura dell'attenuazione acustica di una parete con profilo metallico con l'aggiunta di Knauf Silentboard

Esistente	Potenziamento	Misura del potere fonoisolante $R_{w,R}^{1)}$
 W111 - C 100 1x 12,5 GKB per ogni lato della parete	 1x 12,5 Silentboard per ogni lato della parete	56 dB
 W112 - C 100 2x 12,5 GKB per ogni lato della parete	 1x 12,5 Silentboard per ogni lato della parete	66 dB

Misura dell'attenuazione acustica di una parete con montante in legno con l'aggiunta di Knauf Silentboard

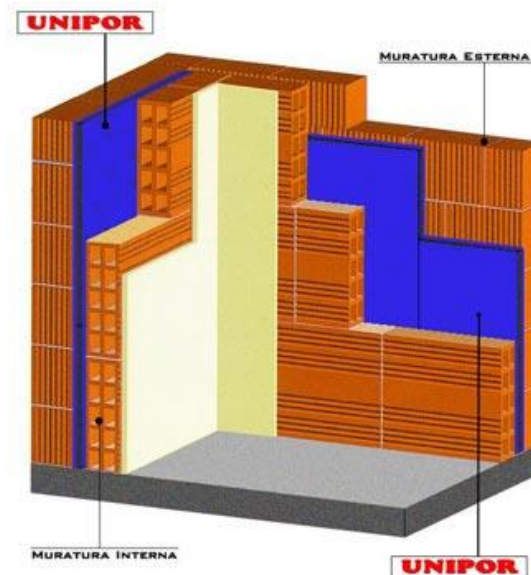
Esistente	Potenziamento	Misura del potere fonoisolante $R_{w,R}^{1)}$
 Montante in legno 60/60 mm 1x 25 Lastra massiva 1x 12,5 Diamant per ogni lato della parete	 Controparete con profilo C Plus e gancio distanziatore 1x 12,5 / 2x 12,5 Silentboard	62 dB / 69 dB

Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico

SCHEDA PRODOTTO FONOASSORBENTE

TIPO MATERIALE	NORMA	UNITA' DI MISURA	VALORE
DESCRIZIONE MATERIALE			
SPESSORE	UNI EN 823	mm	10
RIGIDITA' DINAMICA	UNI EN 29052-1	MN/m ³	28
ISOLAMENTO ACUSTICO AL CALPESTIO	UNI EN 12354-2	dB	27 ⁽¹⁾
COMPRIMIBILITA'	UNI EN 12431	mm	1,5
CONDUTTIVITA' TERMICA	UNI EN 12667	W/mK	0,04
COEFFICIENTE DI RESISTENZA ALLA DIFFUSIONE AL VAPORE	UNI EN 12086	μ	> 2000

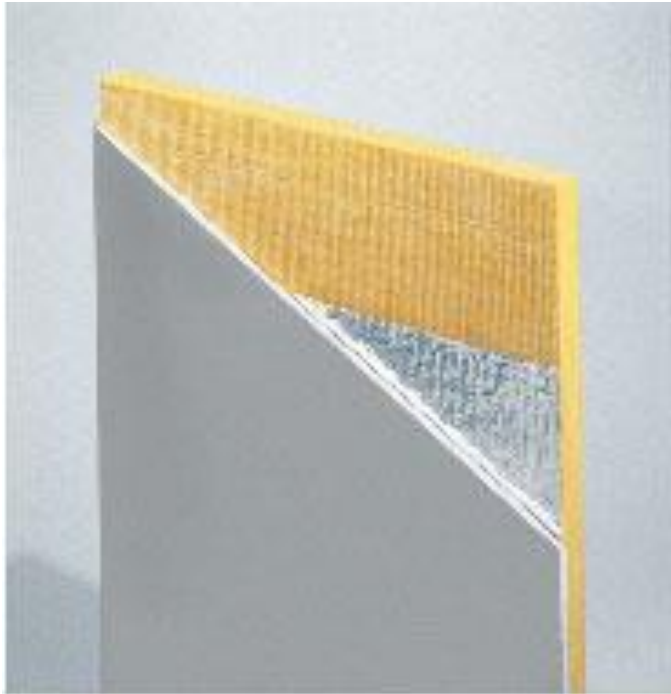
(1) Valore calcolato considerando un solaio sp. 22 con massa superficiale 200 Kg/mq, uno stato di livellamento sp.5 cm con massa superficiale 19 Kg/mq e un massetto sp.5 cm con massa superficiale 120 Kg/mq.



Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico

CALIBEL – SAINT GOBAIN ISOVER

Pannello in lana di vetro incollato ad una lastra di gesso rivestito.



Potere
fonoisolante

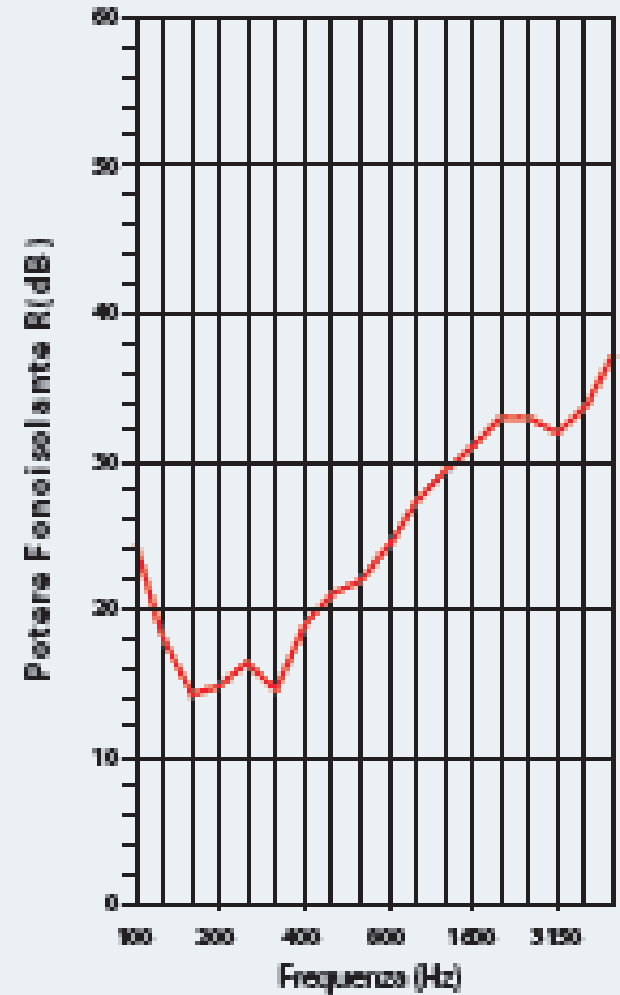
Livello di
rumore di
calpestio
dei solai

Prestazioni acustiche		
Isolamento acustico		
Descrizione struttura	Rw struttura nuda (dB)	Rw struttura doppiata con Calibel (dB)
Mattone forato 8 cm intonacato da entrambe le parti	38,5 (1)	53,5 sp. 40+13 mm
Mattone pieno 25 cm intonacato da ambo le parti	53 (2)	61 sp. 40+13 mm
Solaio latero-cemento 35 cm	54,5 (3)	66 sp. 30+13 mm
Isolamento ai rumori di calpestio		
Descrizione struttura	Lnw struttura nuda (dB)	Lnw struttura doppiata con Calibel (dB)
Solaio latero cemento 35 cm	75 (3) dB	56,5

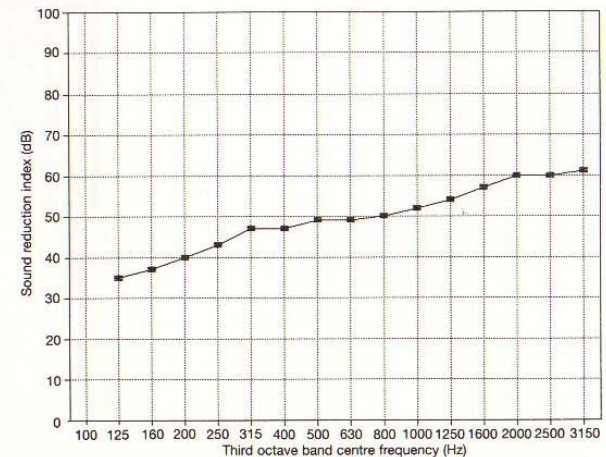
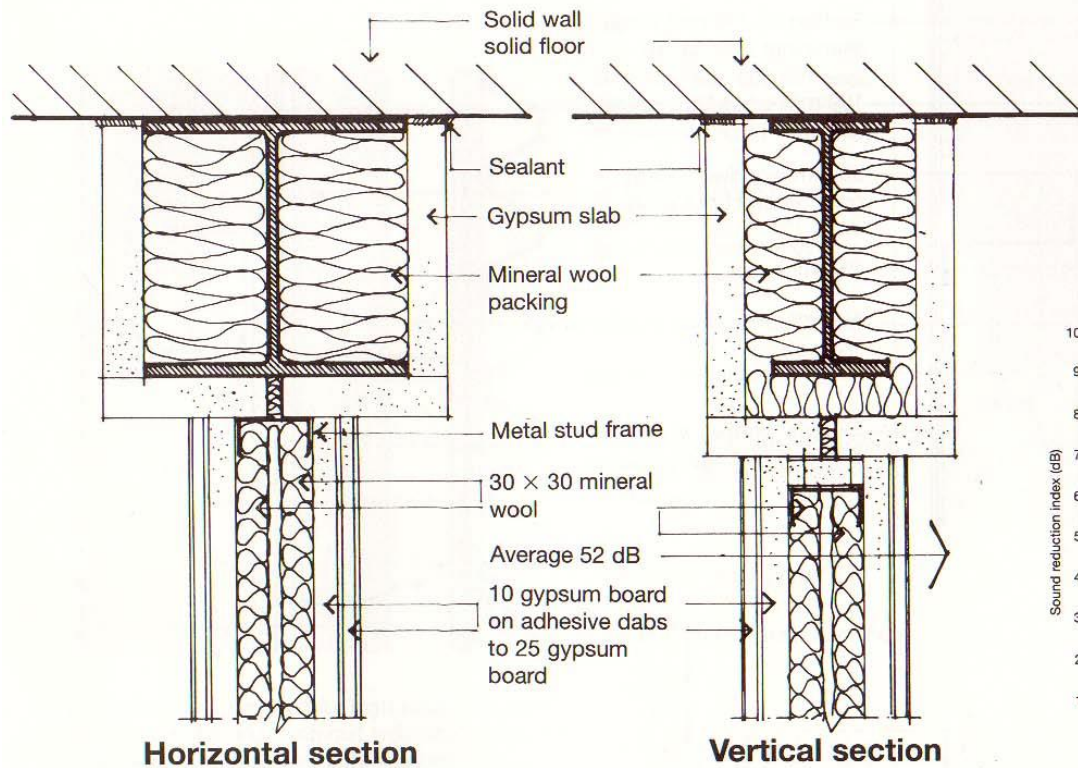
Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico



Isolamento a parete



Potere fonoisolante di partizioni interne



100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Hz
	35	37	40	43	47	47	49	49	50	52	54	57	60	60	61	dB

Junctions to structural steelwork

Source: Dr Lang
Technologisches
Gewerbe Museum,
Vienna

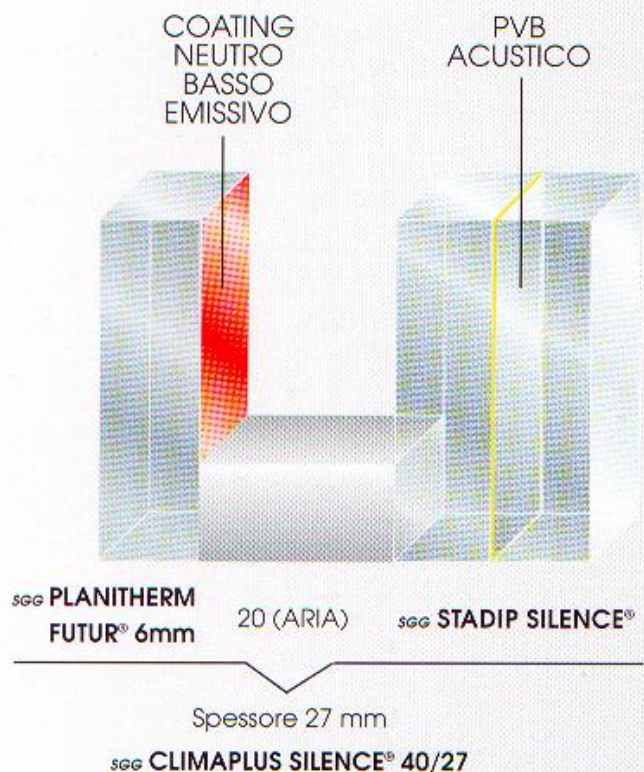
Partitions

Potere fonoisolante di pareti tipo

Potere fonoisolante di alcuni tipi di pareti e divisori (valori indicativi)

TIPO DI DIVISORIO	Potere fonoisolante (in dB), alle frequenze (Hz)						Indice I (I.S.O.)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Parete di mattoni pieni intonacata (spessore 12 cm, peso 220 kg/m ²)	34	35	40	50	55	57	45
id. (spessore 24 cm, peso 440 kg/m ²)	40	44	50	56	57	57	54
Parete di mattoni forati (spessore 28 cm)	37	43	52	60	64	65	57
Parete in calcestruzzo intonacata (spessore 18 cm, peso 440 kg/m ²)	40	42	50	58	66	68	54
Parete in calcestruzzo (2 strati di 5 cm, separati da intercapedine di 2,5 cm)	37	40	44	50	56	62	49
id. (2 strati di 7,5 cm, separati da intercapedine di 7,5 cm)	37	40	50	54	56	63	52
Divisorio in gesso-perlite (spessore 5 cm, peso 49 kg/m ²)	26	28	30	31	42	47	33
id. (spessore 6,3 cm, peso 107 kg/m ²)	31	30	29	35	45	52	34
Tramezzo mobile	15	22	26	27	33	35	29
Tramezzo mobile munito di pannelli vetrati (cristallo 7 ÷ 9 mm di spessore)	17	20	25	24	28	28	26
Tramezzo mobile munito di pannelli vetrati con doppio cristallo (2 lastre uguali, distanti 1 cm)	17	20	23	33	33	33	25
Tramezzo mobile munito di pannelli vetrati con doppio cristallo (2 lastre di diverso spessore, distanti 4 cm)	22	27	30	30	36	38	32
id. con porta	20	22	27	30	30	35	30
Doppia finestra	16	24	36	50	54	58	36

Isolamento acustico delle superfici vetrate



ESEMPI DI VETRATE ISOLANTI CON sgg STADIP SILENCE®

PRODOTTI sgg CLIMALIT SILENCE®
(A = stratificato con sgg CLIMALIT SILENCE®)

ABBATTIMENTO ACUSTICO
Rw dB

SGG CLIMAPLUS 1.9 **32**

(FLOAT 4 - 12 - sgg EKO PLUS® 4)

SGG CLIMALIT SILENCE 40/21 **40**

(44.1 A - 6 - FLOAT 6)

SGG CLIMAPLUS SILENCE 40/27 **40**

(sgg PLANITERM FUTUR® 6 - 12 - 44.1A)

SGG CLIMALIT SILENCE 43/31 **43**

(44.1A - 12 - VISARM 64.R)

SGG CLIMALIT SILENCE 47/40 **47**

(64.2A - 20 - 44.2A)

SGG CLIMALIT SILENCE 51/40 **51**

(64.2A - 20 SF6 - 44.2A)

In ambienti che richiedono elevata qualità acustica (studi di registrazione, etc) questi elementi architettonici rivestono un ruolo fondamentale. Il vetro può raggiungere di per sé **buone performance** ma dipende moltissimo dal tipo di telaio, controtelaio e montaggio.

È indispensabile che l'infisso sia fornito di doppio vetro, meglio se di spessore elevato e differenziato, in modo da ridurre le risonanze di accoppiamento.

I vetri devono essere montati su telai separati e devono essere tenuti da guarnizioni smorzanti in gomma o neoprene.

Attenuazione delle vibrazioni

L'impiego di supporti in neoprene è utile per impedire la trasmissione delle vibrazioni dalle macchine (pompe, ventilatori, gruppi frigo, etc) alle strutture di sostegno.

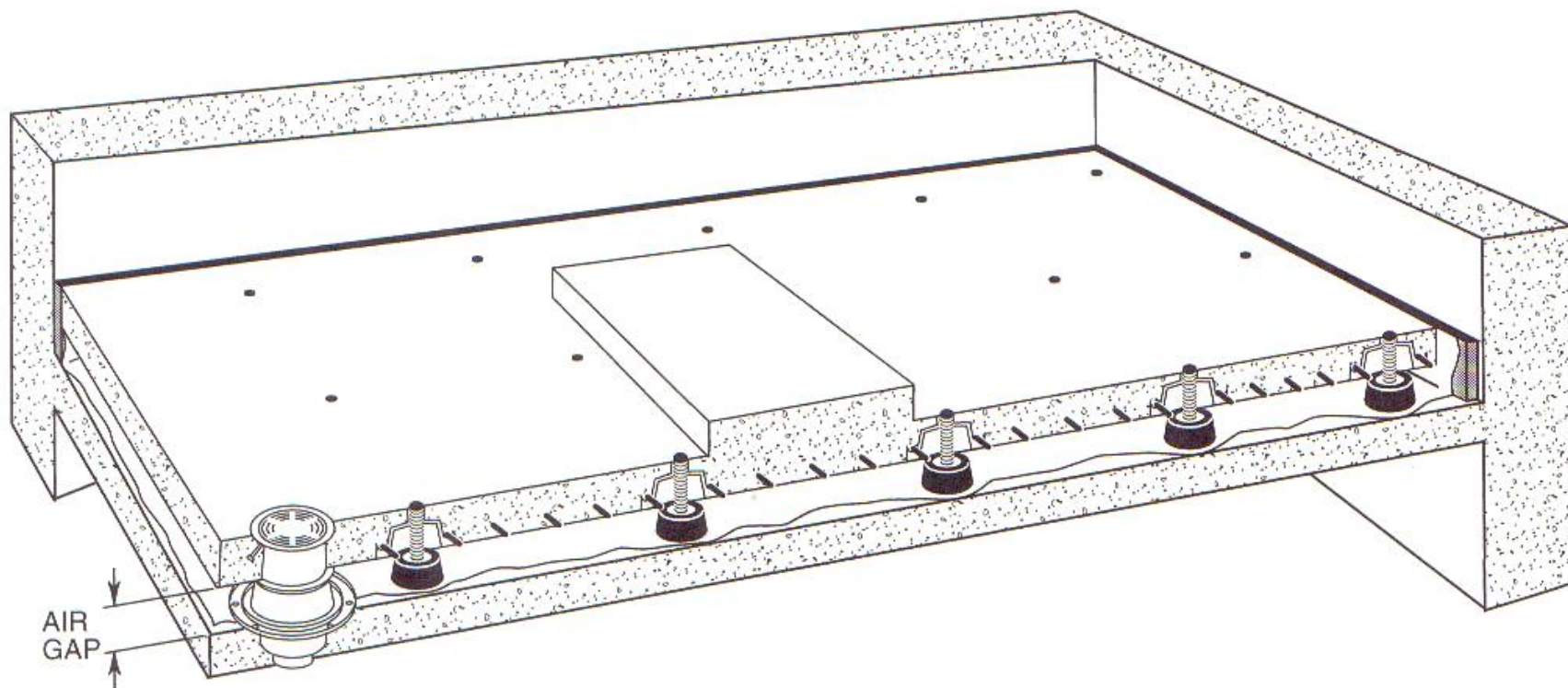


Figure 2.13 Illustration of a floating floor supported by neoprene mounts. (Courtesy of Mason Industries.)

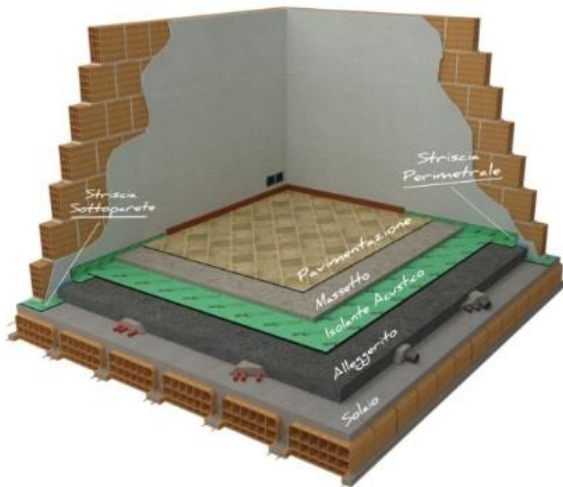
Materiali e sistemi costruttivi per l'isolamento acustico

LINEA ROLL - ISOLGOMMA

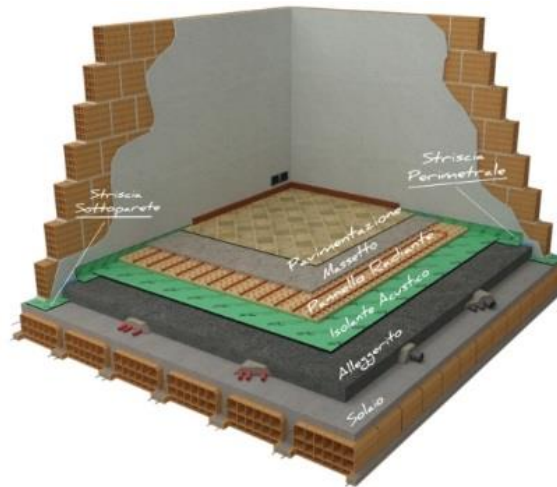
Isolante acustico in rotolo di spessore variabile (5-7-10 mm) composto da fibre e granuli di gomma SBR ancorati a caldo con lattice carbossilato ad un supporto in tessuto non tessuto antistrappo. Rotolo lungo 500 cm in lunghezza, 104 cm in larghezza comprensivo di 4 cm di bordo laterale adesivizzato per la sovrapposizione dei rotoli in fase di posa

Prodotto riciclabile ottenuto con il 95% di materiale riciclato.

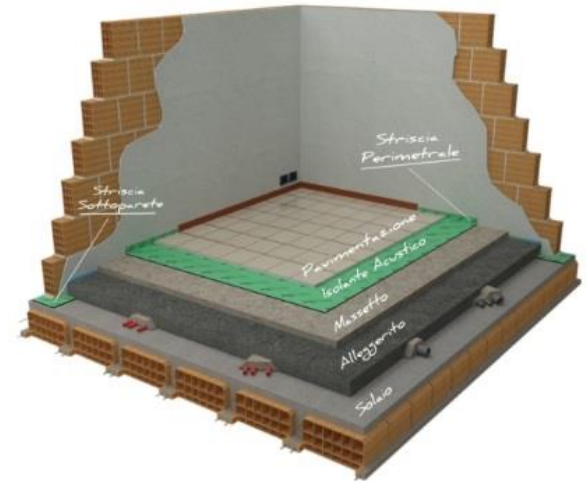
Massetto flottante



Riscaldamento a pavimento



Sottopavimento



Criteri generali validi in acustici edilizia - solai

Pavimento e massetto degli impianti devono essere **disaccoppiati** dalle pareti e dal solaio strutturale attraverso l'interposizione di **materassini elastici**. Ciò permette di intercettare l'onda sonora e impedirne la trasmissione alle unità immobiliari (o stanze) sottostanti o adiacenti.

Per i rumori di calpestio, i controsoffitti possono essere utili per eliminare la componente di suono che passa per via aerea ma non sono la soluzione al problema.

MODALITA' D'USO



Incollare la striscia adesiva alla parete e al solaio realizzando gli angoli con cura



Stendere l'isolante acustico con i granuli di gomma rivolti verso il basso



Incollare la cimosa adesiva aiutandosi con le linee di sormonto



Realizzare il massetto



Posare la pavimentazione in ceramica o legno



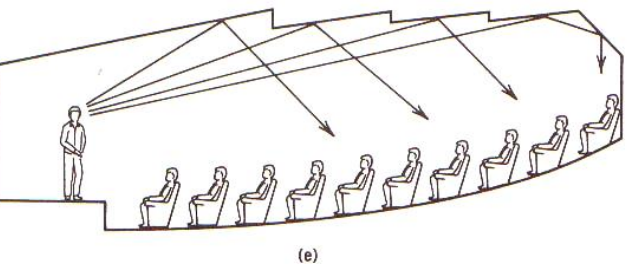
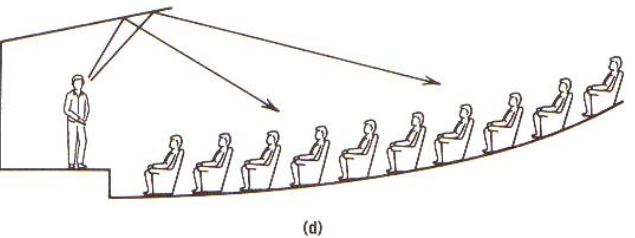
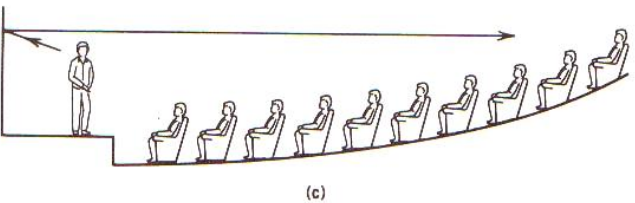
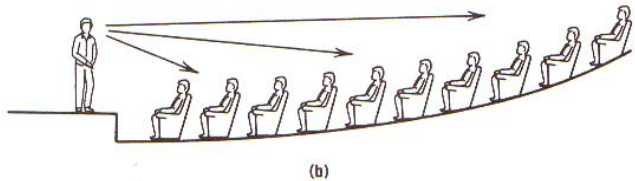
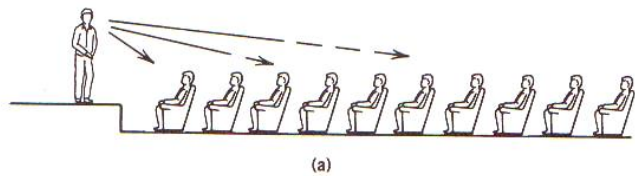
Tagliare la parte eccedente della striscia alla parete

Acustica e illuminotecnica

Acustica degli ambienti chiusi

Marco Frascarolo, ing, PHD

**Università degli Studi di Roma Tre
Dipartimento di Architettura**



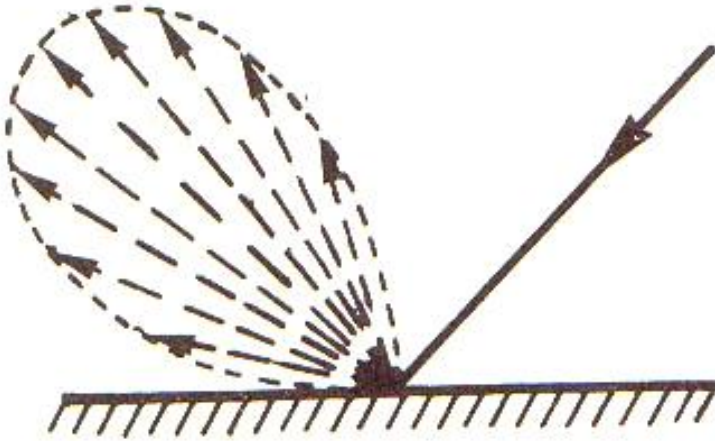
Acustica dei suoni desiderati

Energia sonora diretta e riflessa

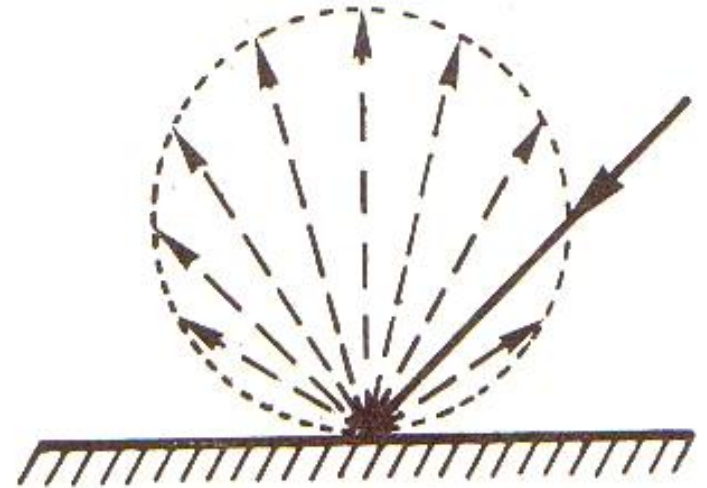
Disegno delle superfici riflettenti

Riflessione acustica

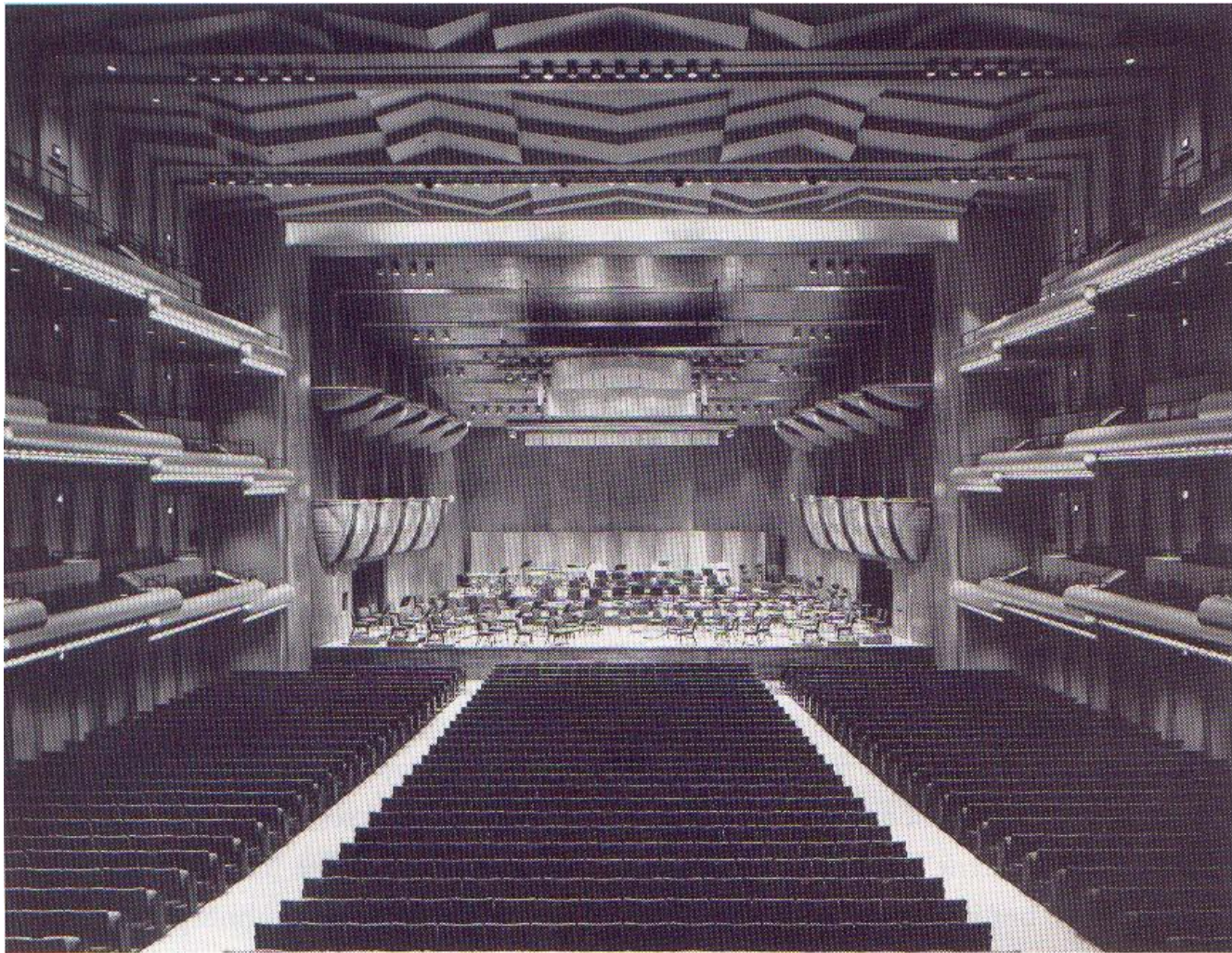
semidiffusa



perfettamente diffusa

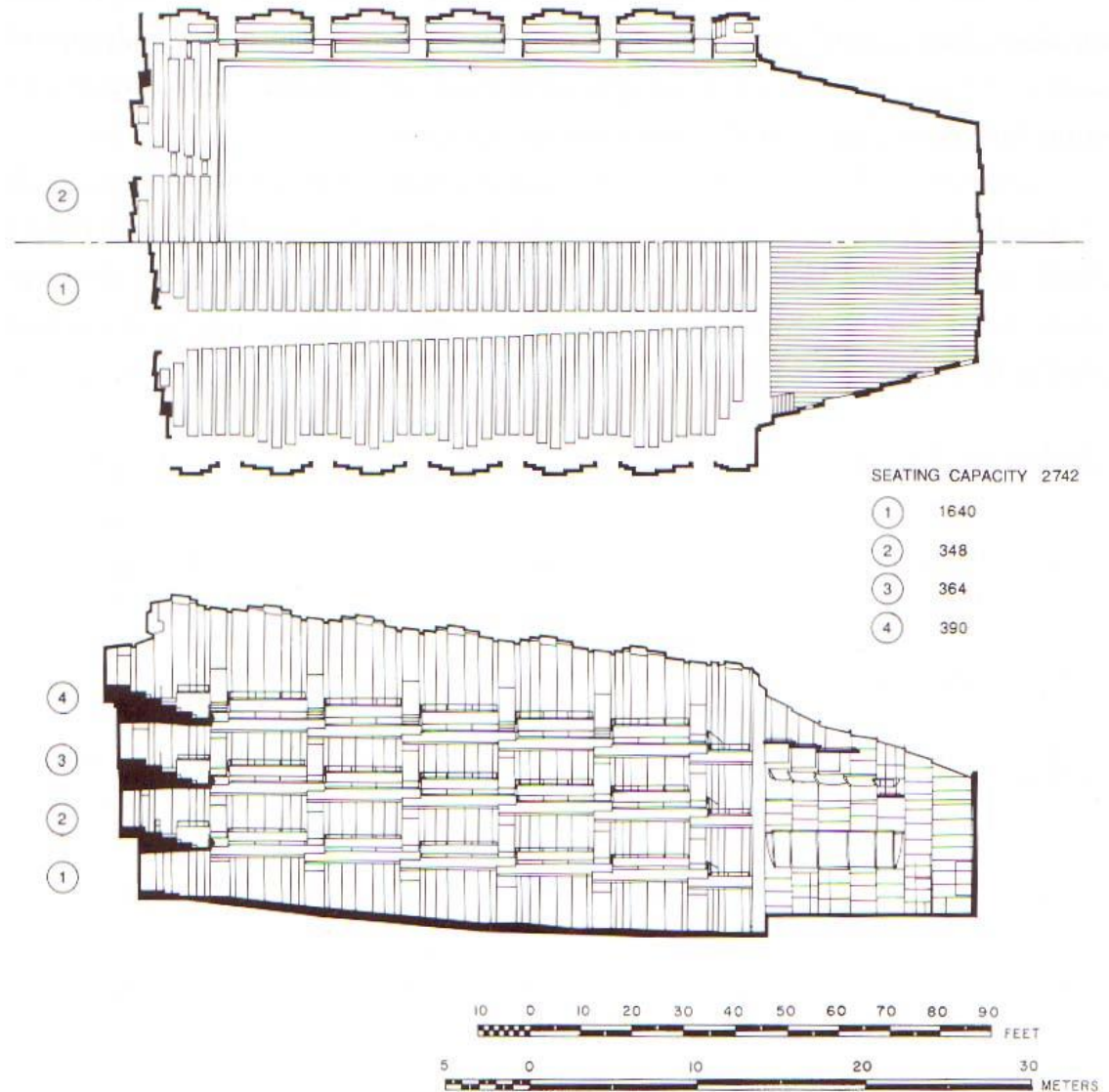


Sala da concerto: tipologia “shoe box“



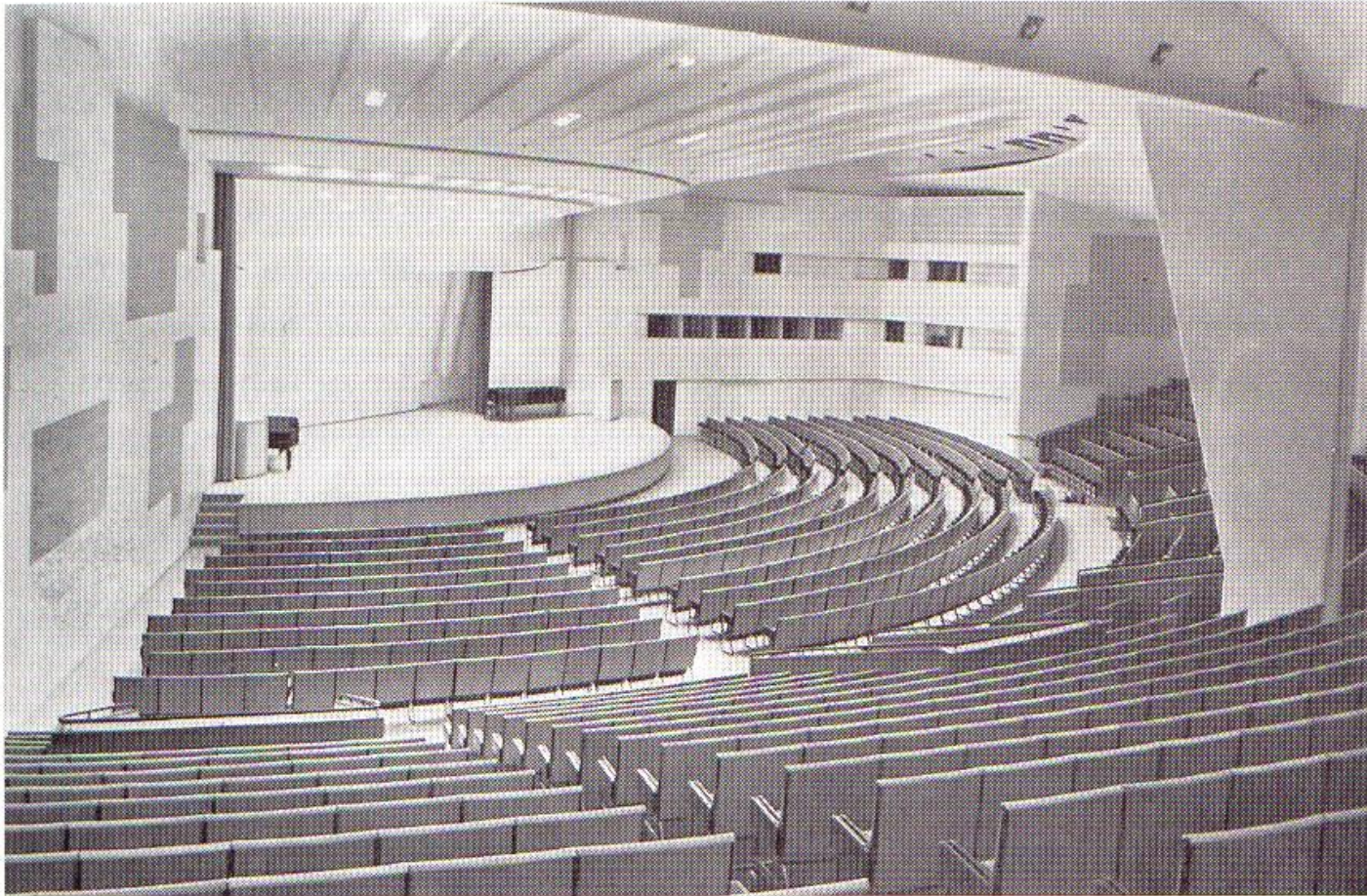
NEW YORK, AVERY FISHER HALL

Sala da concerto: tipologia “shoe box”

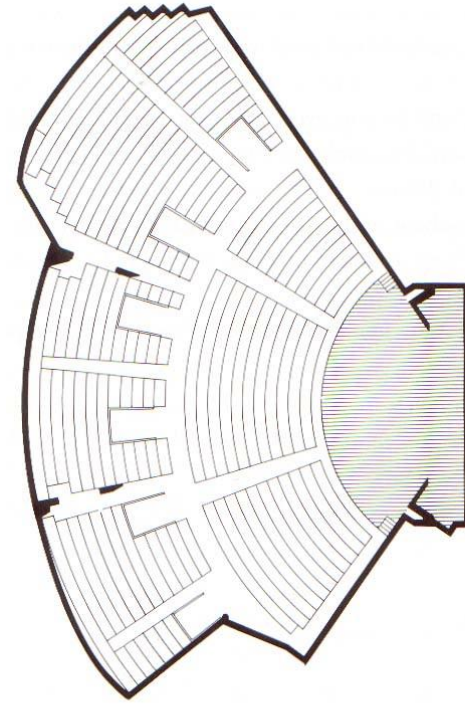


Sala da concerto: tipologia “a ventaglio”

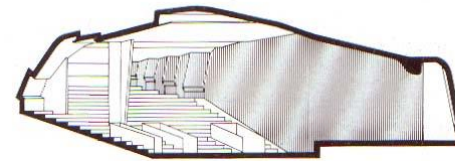
HELSINKI, KULTTUURITALO



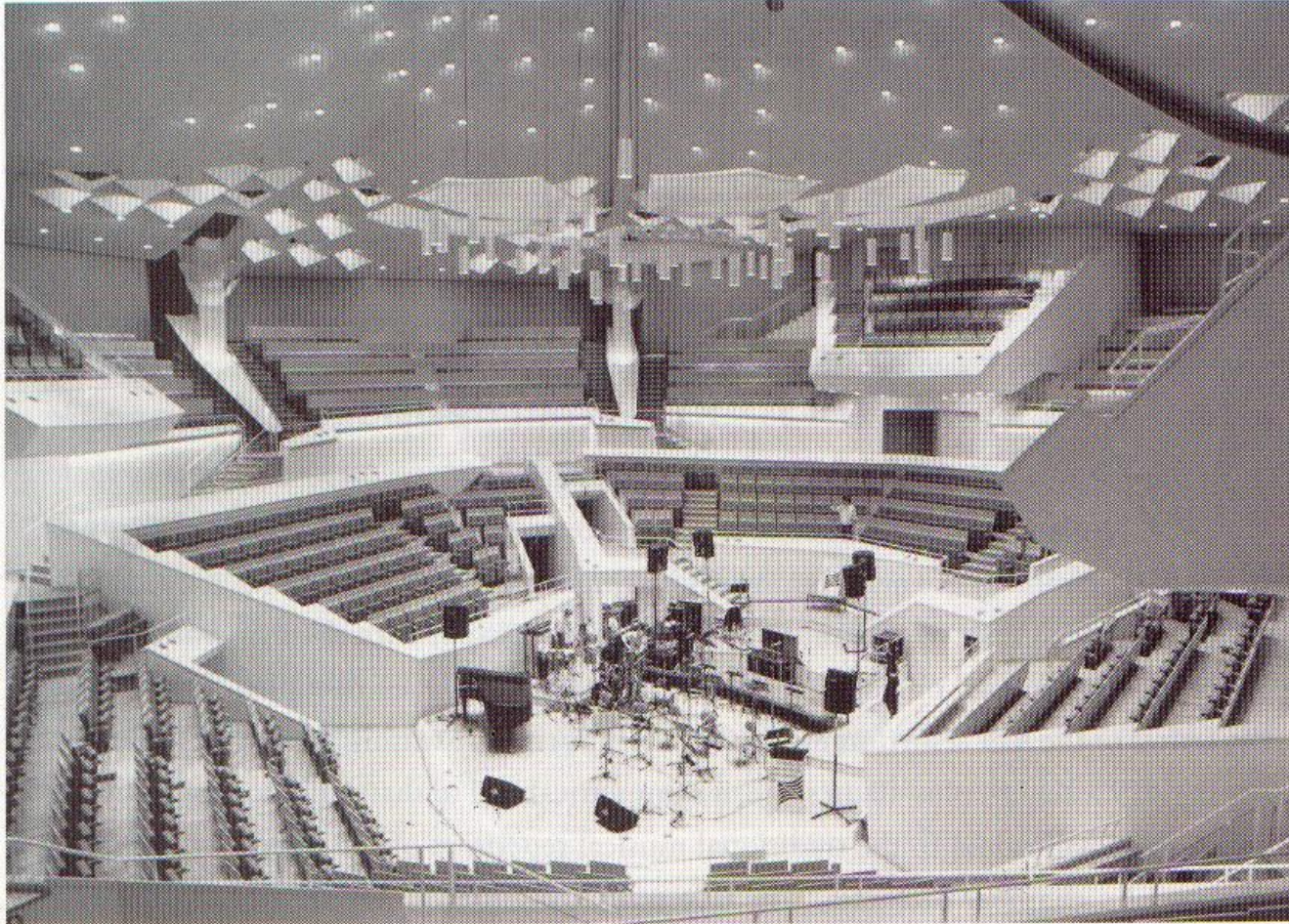
Sala da concerto: tipologia “a ventaglio”



SEATING CAPACITY 1500

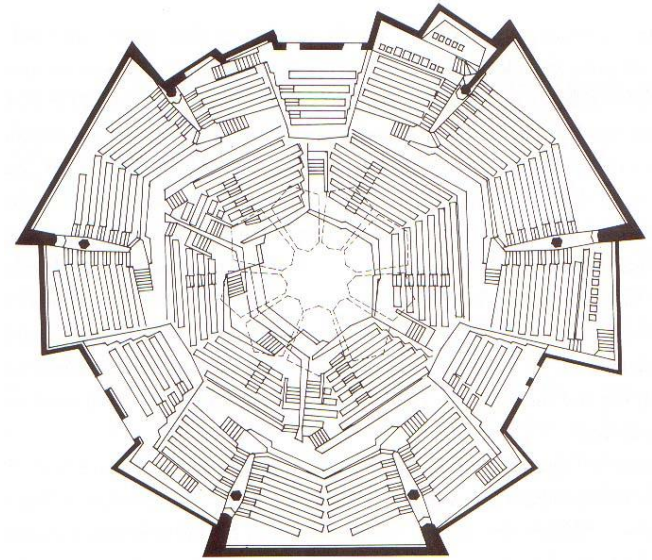


Sala da concerto: tipologia “a pianta centrale”

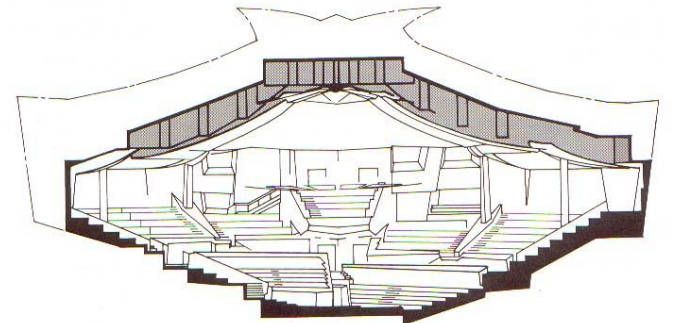


BERLIN, KAMMERMUSIKSAAL DER PHILHARMONIE

Sala da concerto: tipologia “a pianta centrale”



SEATING CAPACITY 1138



Metodi per l'analisi del comportamento acustico di un ambiente chiuso

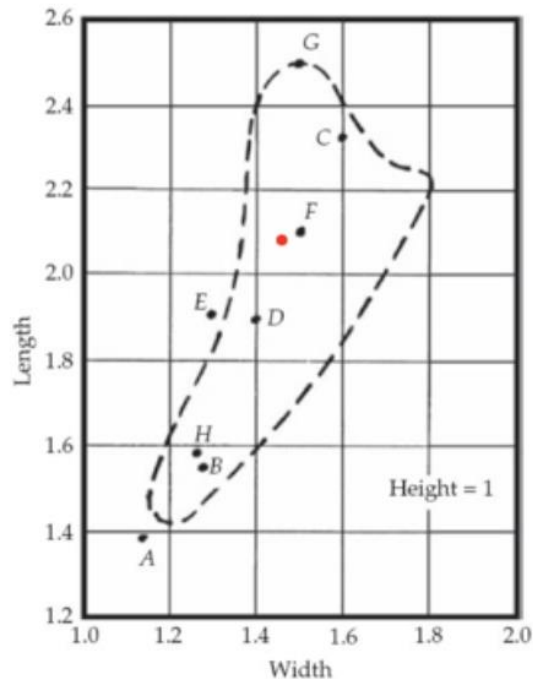
Teoria delle onde o teoria modale: metodo basato sullo studio dei modi propri di oscillazione nell'ambiente attraverso la **risoluzione analitica** dell'equazione delle onde (equazione di Helmholtz) . È il più corretto dal punto di vista fisico ma nella pratica è difficilmente applicabile a geometrie complesse.

Metodo geometrico: Il concetto di onda sonora è sostituito da quello di raggio sonoro corrispondente ad una piccola porzione di onda sferica e caratterizzato da una direzione di propagazione. Si trascura la natura ondulatoria del fenomeno pertanto l'energia sonora dell'onda viene equamente ripartita su tutti i raggi. Si modella la riflessione dei raggi secondo le leggi dell'**ottica geometrica**. Vale nei casi in cui la lunghezza d'onda del suono è molto minore della minima dimensione del locale e/o degli ostacoli presenti.

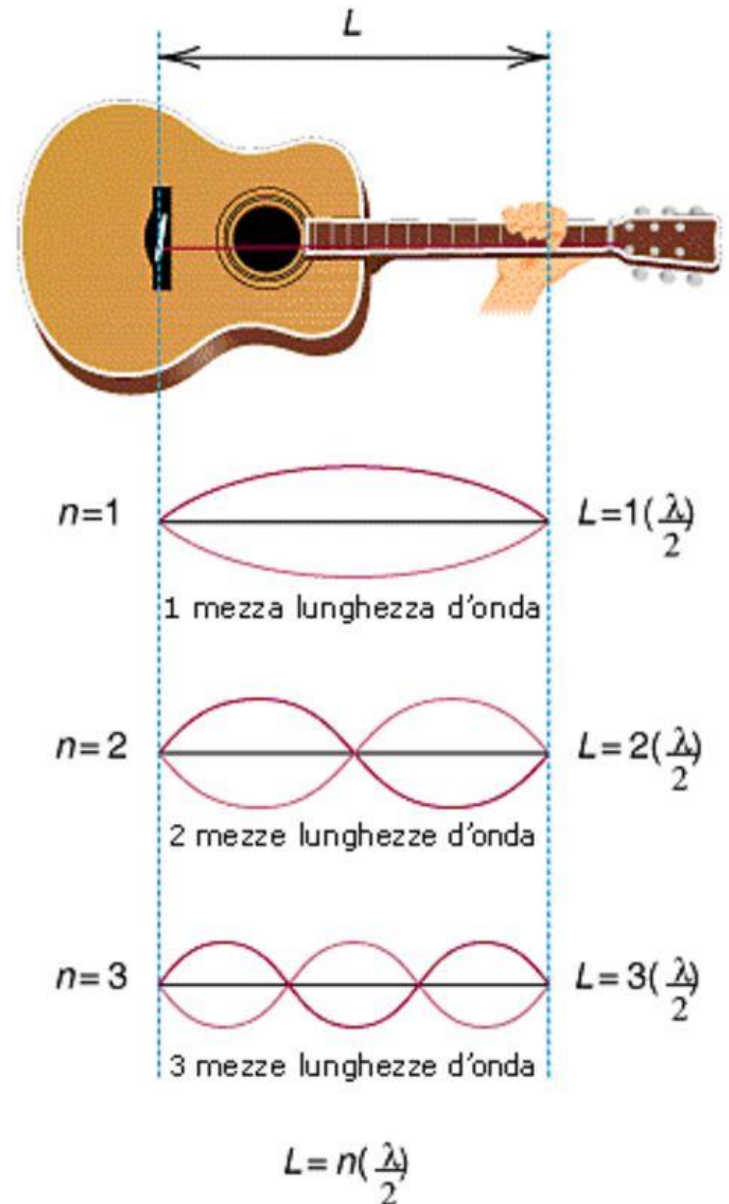
Teoria statistica: Si basa sull'ipotesi che il campo acustico sia omogeneo in tutto l'ambiente, ovvero perfettamente diffuso. Non considera i singoli raggi ma suppone che l'energia acustica in ogni punto possa giungere da tutte le direzioni in maniera assolutamente casuale, secondo le probabilità che i vari cammini hanno di essere effettivamente percorsi. Le grandezze caratteristiche saranno descritte da **valori medi**.

Onde stazionarie

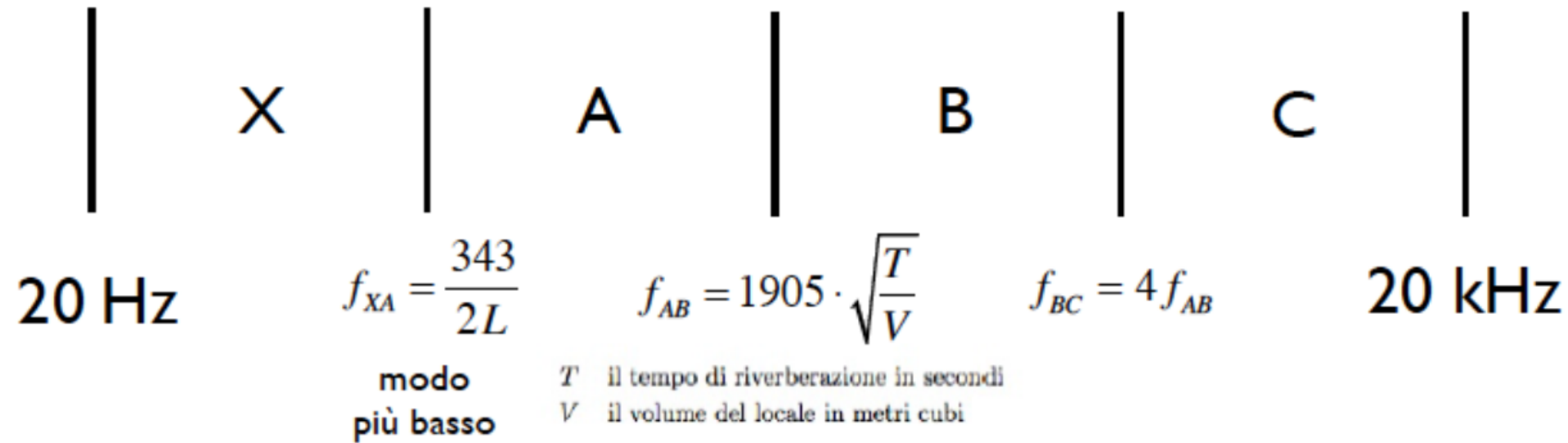
Un'onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio. Si manifestano in ogni spazio chiuso di forma regolare delimitato da superfici parallele. Sono definite anche **modi propri di vibrazione** o più semplicemente **risonanze dell'ambiente** e si definiscono dalla risoluzione della teoria delle onde. Una volta individuate, la stanza deve essere progettata in modo da evitare un'acustica irregolare che abbia una **risposta in frequenza non lineare (distorsioni)**.



All'interno dell'Area di Bolt siamo ragionevolmente sicuri di avere una buona distribuzione delle basse frequenze.



Divisione spettro udibile



Regione X : non è percepito nessun rinforzo modale

Regione A : modi normali, le onde stazionarie sono percepite (TEORIA DELLE ONDE)

Regione B : fenomeni di diffusione e diffrazione (METODO STATISTICO)

Regione C : riflessione speculare (METODO GEOMETRICO)

Attenuazione dei suoni in campo libero ed in ambiente chiuso

In campo libero il suono decade di **6 dB** ad ogni raddoppio di distanza.

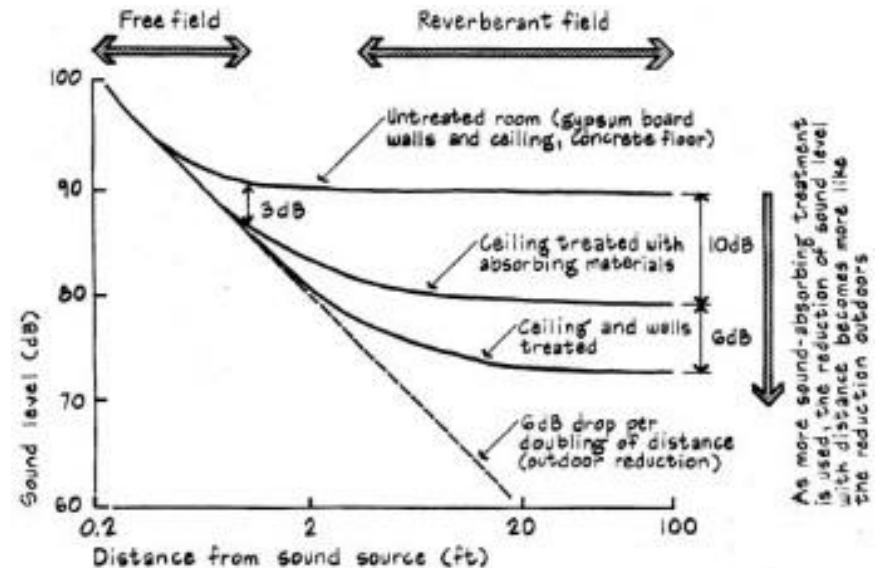
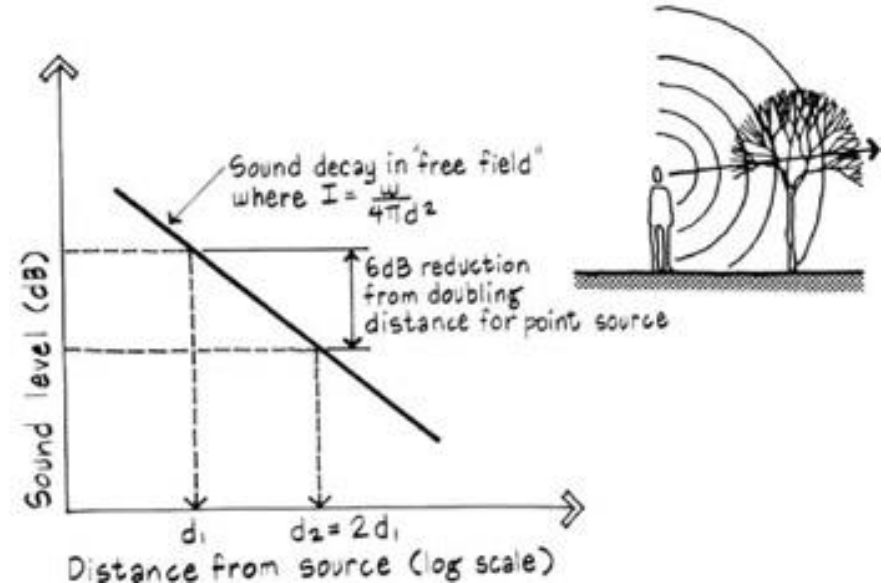
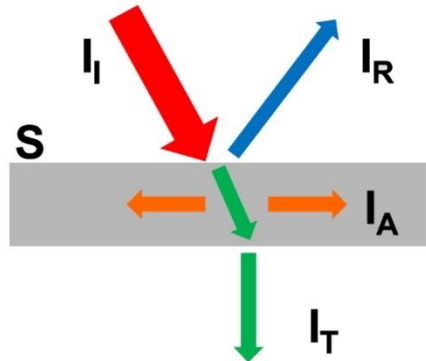
In ambiente chiuso il decadimento del suono dipende dai **materiali** che costituiscono le superfici dell'ambiente (muri, pavimenti, pareti, persone) e dalle loro proprietà assorbenti, riflettenti e diffondenti.

Assorbimento acustico di una superficie:

$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{mq}]$$

Assorbimento acustico totale di una stanza con n superfici:

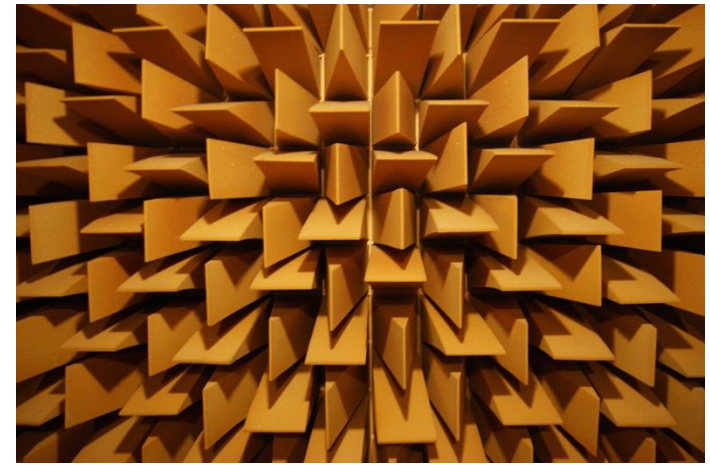
$$A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots + S_n \alpha_n = \sum S_i \alpha_i \quad [\text{mq}]$$



Camera anecoica

Una camera anecoica è un ambiente di laboratorio strutturato in modo da ridurre il più possibile la riflessione dei segnali sulle pareti. Possiede il **massimo potere fonoassorbente** possibile. Si utilizza per effettuare misure in condizioni controllate, nello studio di onde sia acustiche sia elettromagnetiche.

Al suo interno si ha perdita del senso di equilibrio e dell'orientamento.



Campo sonoro in un ambiente confinato

Sorgente in regime stazionario. Dopo un tempo t_1 arriva il fronte d'onda **diretto** con valore L_1 . Al tempo t_2 arriva il suono prodotto dalla **prima riflessione** che si somma a quello dell'onda diretta. La densità di energia sonora si stabilizzerà su un **valore costante** L_0 che rappresenta la condizione di equilibrio energetica dell'ambiente. Quando la sorgente cessa di funzionare, il suono non decade istantaneamente, ma prosegue per riverberazione per un certo tempo. Si ha un andamento inverso rispetto a quello di avviamento.

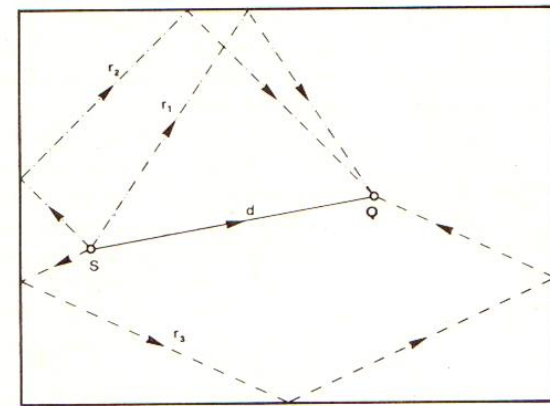


Fig. 3.1 – Riflessioni multiple in una sala.

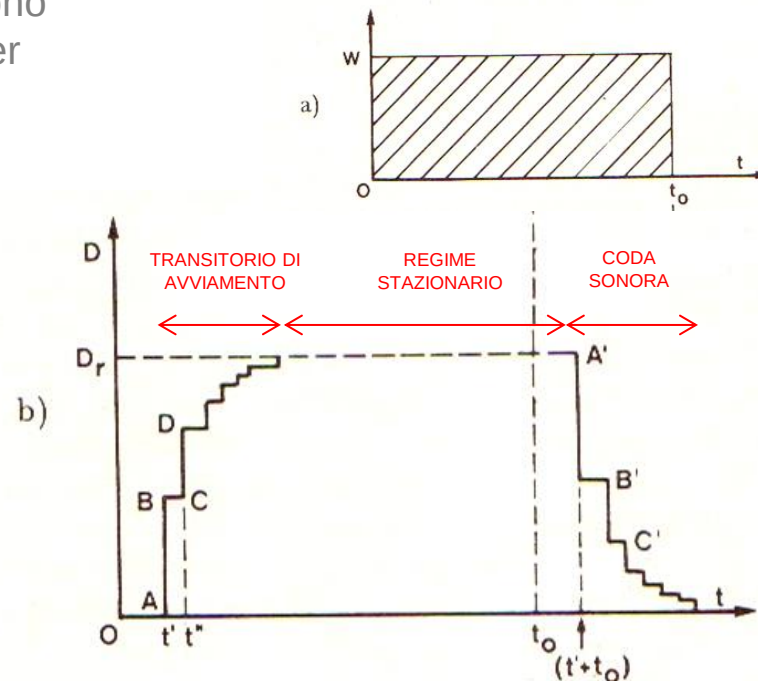
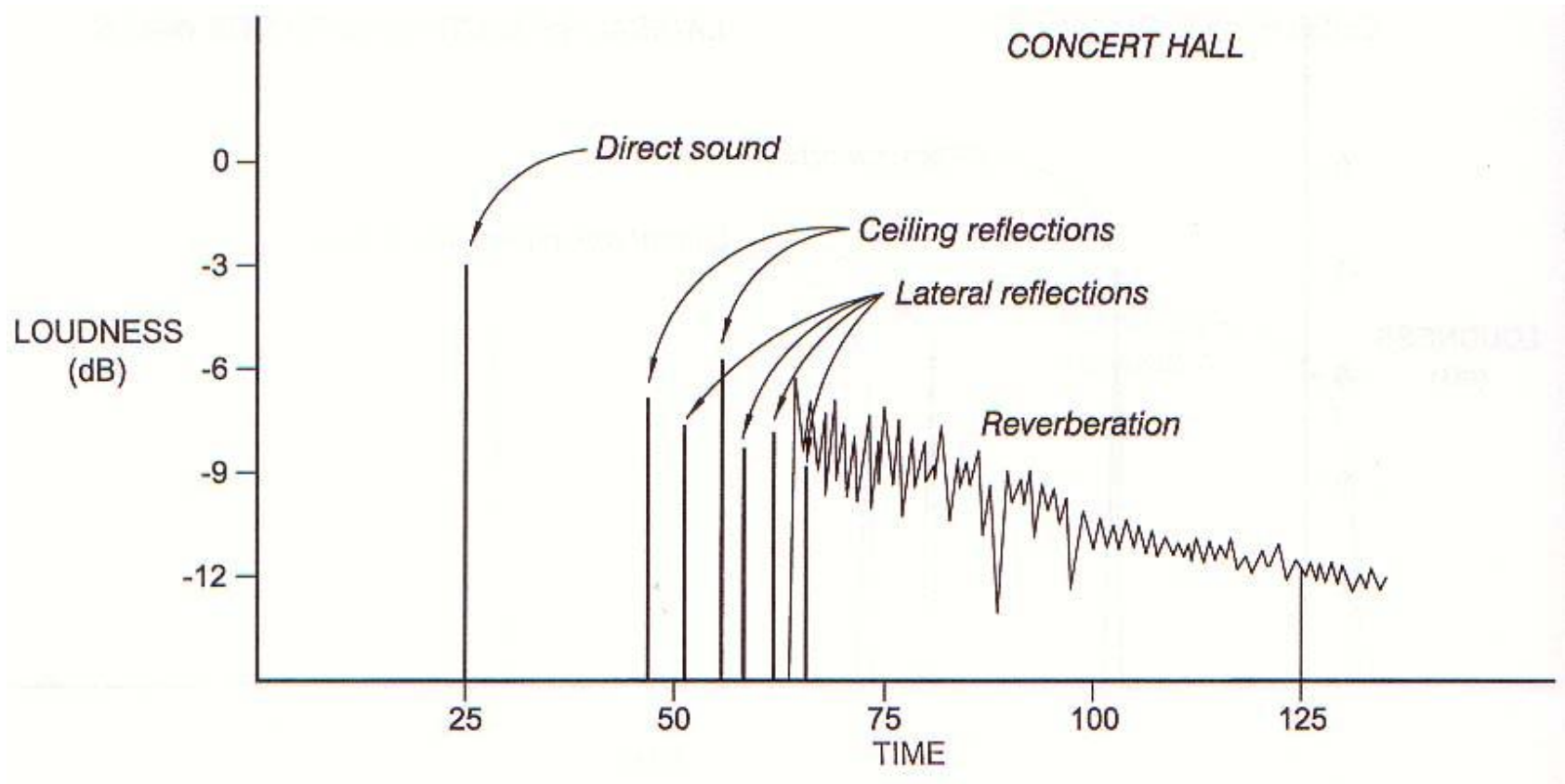


Fig. 3.2 – Effetto della riverberazione in una sala: a) diagramma della potenza irradiata in funzione del tempo; b) diagramma della densità di energia in funzione del tempo.

Suono diretto, prime riflessioni, riverberazione



Tempo di riverberazione

Wallace Clement Sabine (1868-1919) primo studioso di acustica con metodo scientifico.

Professore all'università di Harvard, testò l'acustica della Lecture Hall e comprese che il problema della lunga persistenza del suono che si aveva era dovuto alla grandezza della sala, ai suoi arredi, persone comprese.

Definì il tempo di riverberazione come il tempo necessario affinché la densità di energia sonora decada di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente ha cessato di vibrare.

Tempo di riverberazione $RT_{60} = 0,163 V/A$

V = volume della sala

A = area di assorbimento equivalente = $\sum S_i \alpha_i$

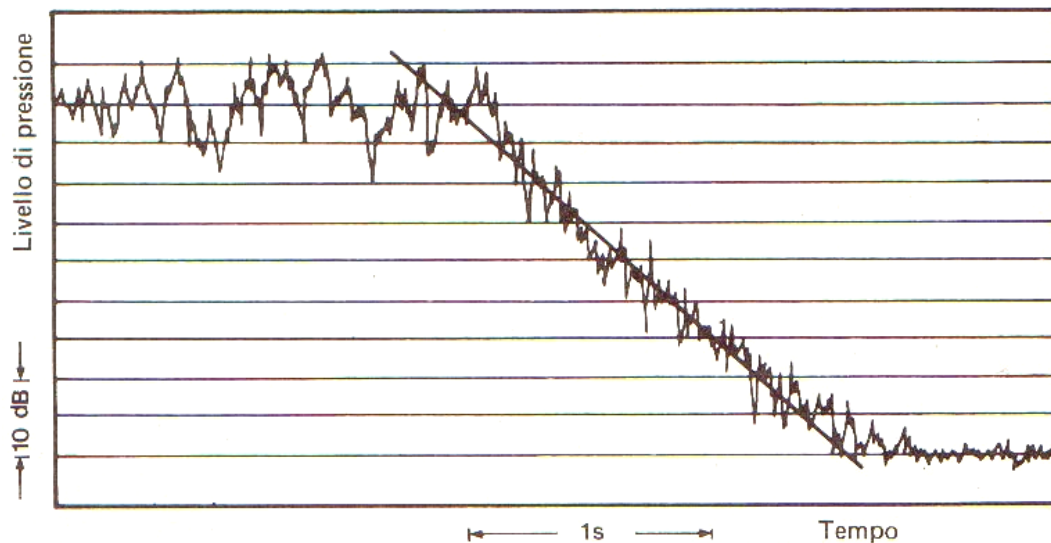
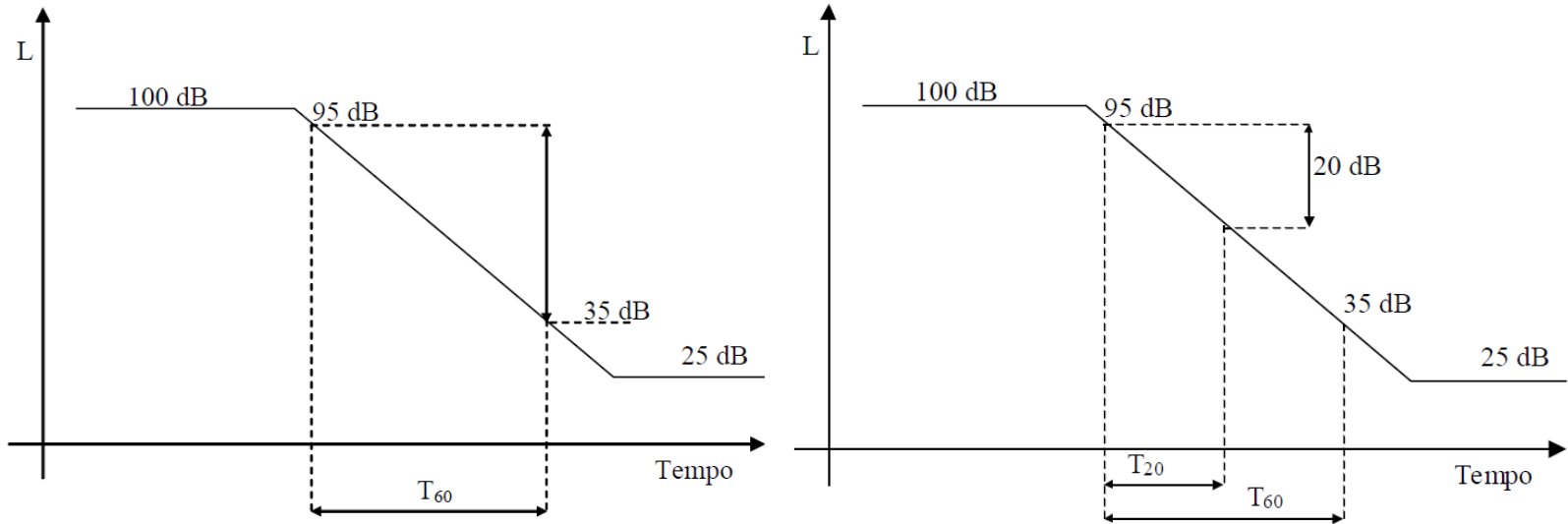


Fig. 3.3 – Esempio di andamento reale del transitorio di estinzione dovuto alla riverberazione (coda sonora), in una sala. In ordinate, la densità di energia rappresentata in scala logaritmica (dB); in ascisse il tempo. La retta inclinata rappresenta l'andamento ideale di tipo esponenziale, previsto dalla approssimazione di Sabine (§ 3.3 e 3.5).

Tempo di riverberazione

Nella pratica comune attuale è diventato difficile misurare un decadimento di 60 dB poiché oggi il rumore di fondo è assai più alto (insufficiente rapporto segnale rumore della sorgente) e per misurare 60 dB dovremmo avere una sorgente con un livello sonoro troppo elevato. Molto dipende da tempo di esposizione, composizione ed andamento nel tempo ma effetti nocivi sull'organismo si verificano già a 80 dB, con 85 servono protezioni. In campagna si parte da 35 dB. Rumore di fondo solitamente è ad almeno 45 dB.

La normativa attualmente prevede di determinare T_{20} (T_{30}) come tre (due) volte il tempo che intercorre tra il punto -5 e il point -25 rispetto al livello della sorgente stazionaria prima dell'interruzione.



Acustica dei suoni desiderati

Valore massimo ammissibile per una sala priva di impianto di amplificazione del suono, per vari tipi di sorgente sonora.

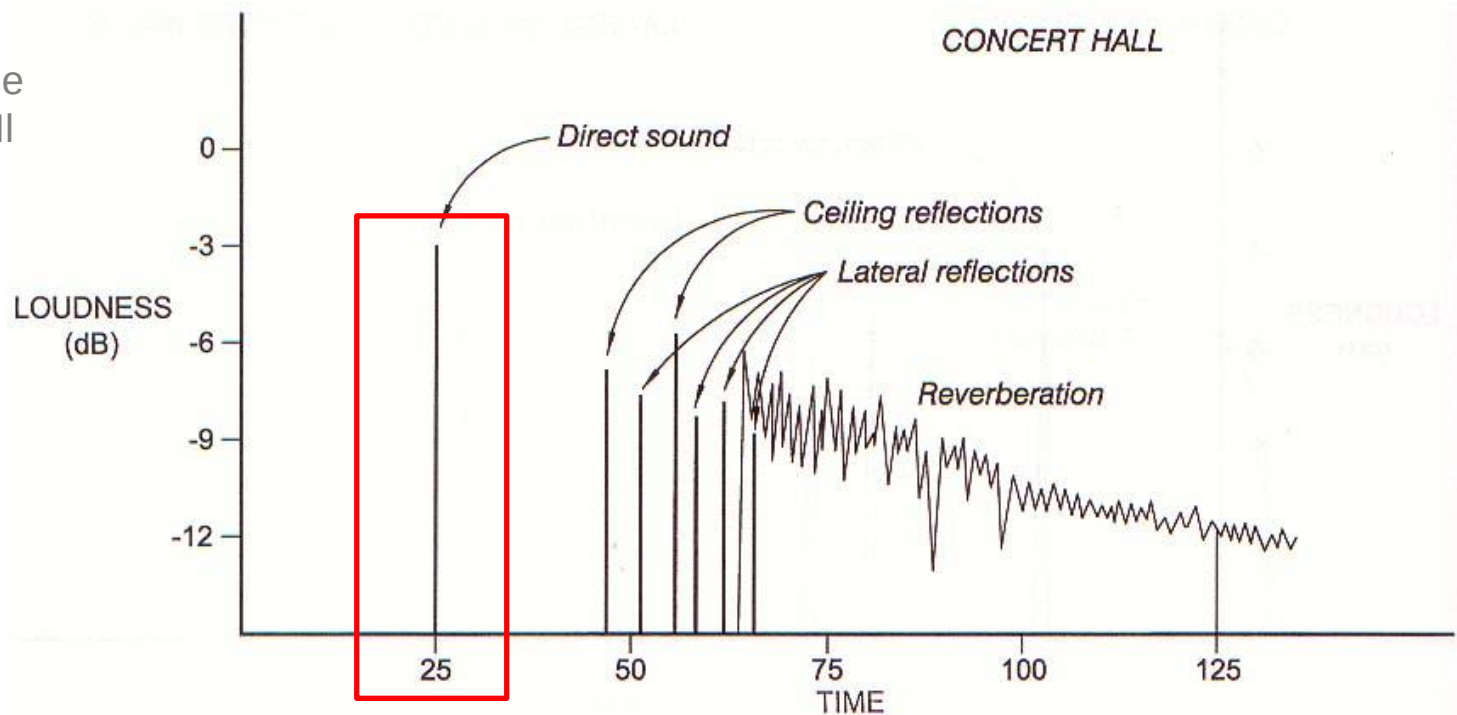
Tipo di sorgente sonora	Massimo volume della sala (m³)
Parlatore medio	3000
Oratore addestrato	6000
Solista strumentale o vocale	10000
Grande orchestra sinfonica	20000
Cori di massa	50000

Suono diretto, prime riflessioni, riverberazione

Il **suono diretto** raggiunge l'ascoltatore percorrendo a minore distanza possibile dalla sorgente e trasmette informazioni relative a :

1. **Posizione della sorgente**
2. **Dimensione della sorgente**
3. **Timbro «vero» della sorgente**

L'assorbimento dei materiali non è uguale a tutte le frequenze. Il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che l'onda diretta ha incontrato.

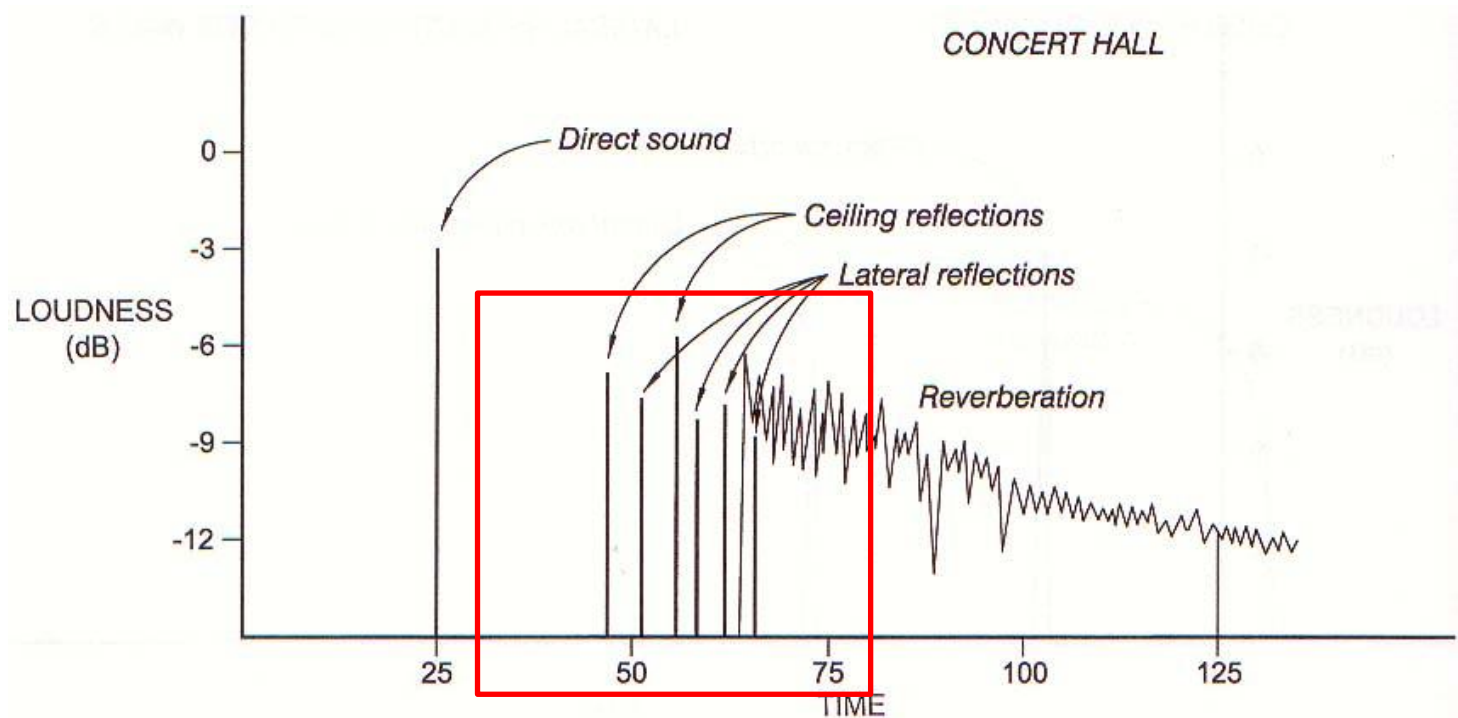


Suono diretto, **prime riflessioni**, riverberazione

Le prime riflessioni raggiungono l'orecchio entro 30 - 80 millisecondi dal suono diretto. Esse sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare al ricettore e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

Le prime riflessioni e il tempo che intercorre tra l'arrivo del suono diretto e l'inizio di esse fornisce informazioni relative a:

1. **Dimensione della stanza**
2. **Rinforza e sostiene il suono** rendendolo più pieno e intenso



Fusione temporale

Le prime riflessioni non risultano udibili separatamente bensì fuse con il suono diretto stesso. L'orecchio umano non è capace di distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le prime riflessioni come parte del suono diretto.

La riverberazione del suono può quindi essere d'aiuto a rinforzare il suono diretto con i contributi delle prime riflessioni che però non devono giungere con troppo ritardo temporale rispetto al suono diretto. In particolare se il ritardo è < 0.030 [s], l'orecchio, oltre a percepire un unico suono rinforzato, ne attribuisce la provenienza alla sorgente stessa (**effetto Haas**).

Le **torri di rinforzo** applicano l'effetto Haas. Le torri di diffusione a metà platea garantiscono la più uniforme possibile copertura sonora.

I diffusori vengono ritardati del tempo che il suono principale impiega ad arrivare alla distanza delle torri più 30 millisecondi.

La differenza tra le due sorgenti sonore non deve comunque eccedere i 10 dB.

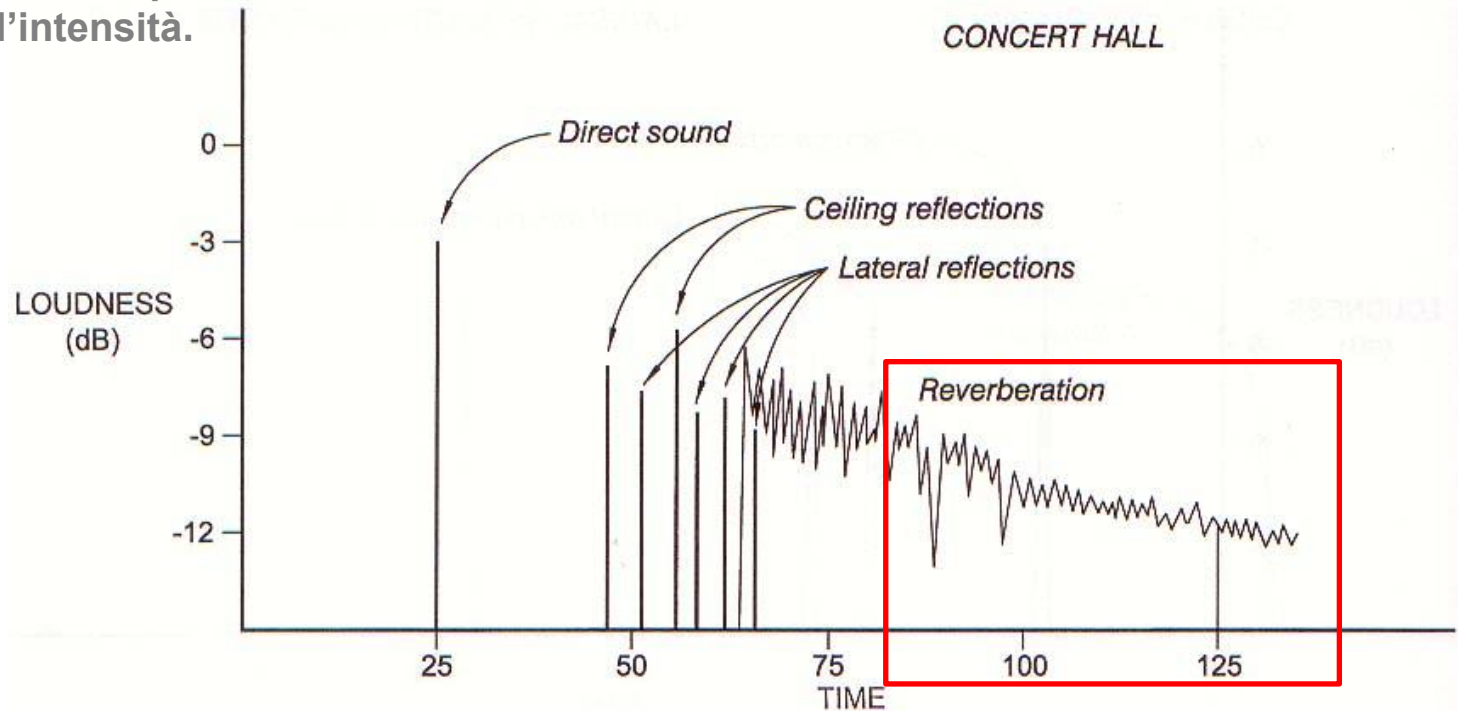


Suono diretto, prime riflessioni, **riverberazione**

La riverberazione è la persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare. È causata dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano, che raggiungono l'ascoltatore dopo 100 millisecondi dal suono diretto. A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, si ha un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfattizzazione delle basse.

La riverberazione è caratterizzata da:

1. **Diminuzione graduale di ampiezza**
2. **Conferisce calore e corposità al suono**
3. **Contribuisce all'intensità.**



Eco

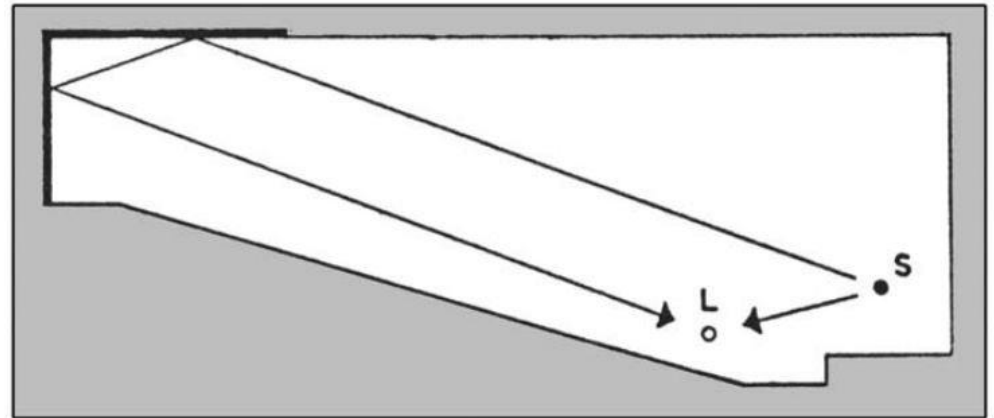
L'eco è un fenomeno prodotto dalla riflessione contro un ostacolo di onde sonore che vengono a loro volta nuovamente "percepite" dall'emettitore con un certo ritardo rispetto al suono diretto e con sufficiente intensità da essere avvertita in maniera distinta.

- Velocità del suono in aria (20°) **$c = 340 \text{ m/s}$**
- L'orecchio umano non distingue due suoni se prodotti a meno di **$t = 100 \text{ millisecondi}$** l'uno dall'altro.

Distanza percorsa **$D = c \cdot t$**

sorgente

ascoltatore



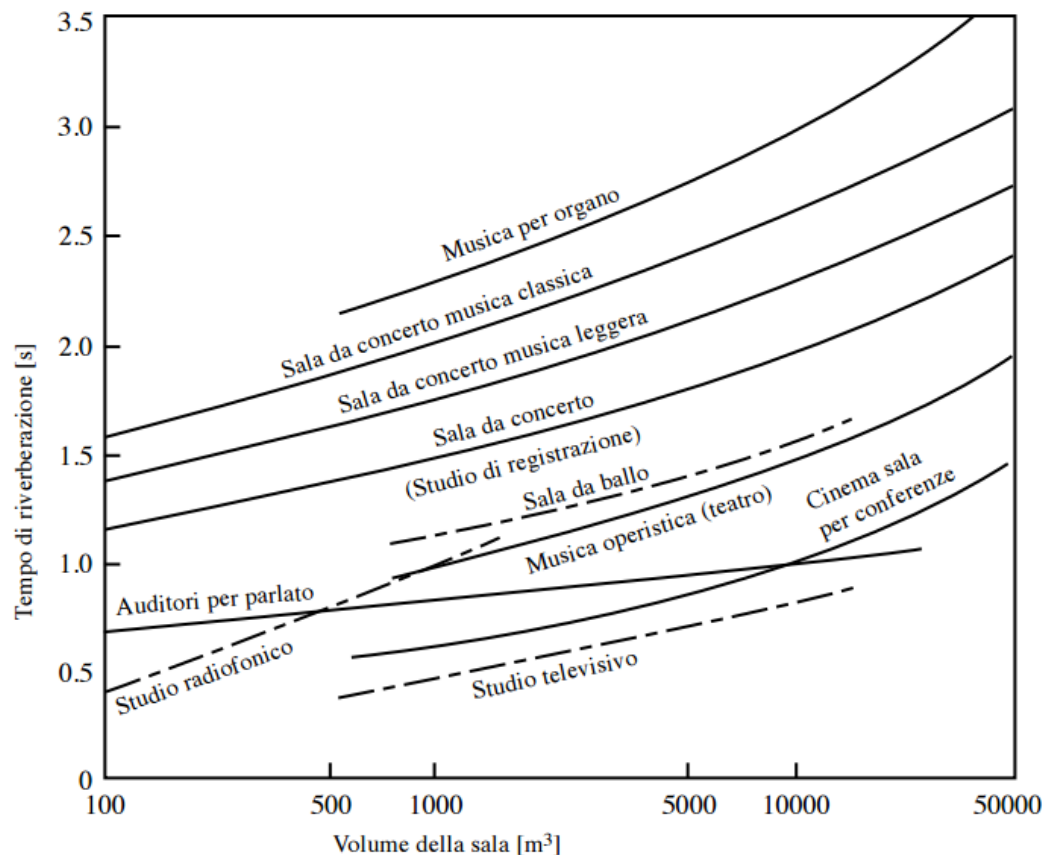
Tempo di riverberazione ottimale

Per la migliore intellegibilità occorre che nel punto di ascolto si abbia un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente.

La riverberazione riveste un duplice ruolo:

- **innalza l'intensità sonora** rispetto a quella del suono diretto;
- **aumenta la dispersione temporale**, incidendo negativamente sulla comprensione delle note e dei fonemi.

Il tempo di riverberazione deve assumere un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.
Non ne esiste uno ottimale valido in generale, esso varia principalmente in funzione della **destinazione d'uso** e delle **dimensioni** della sala.

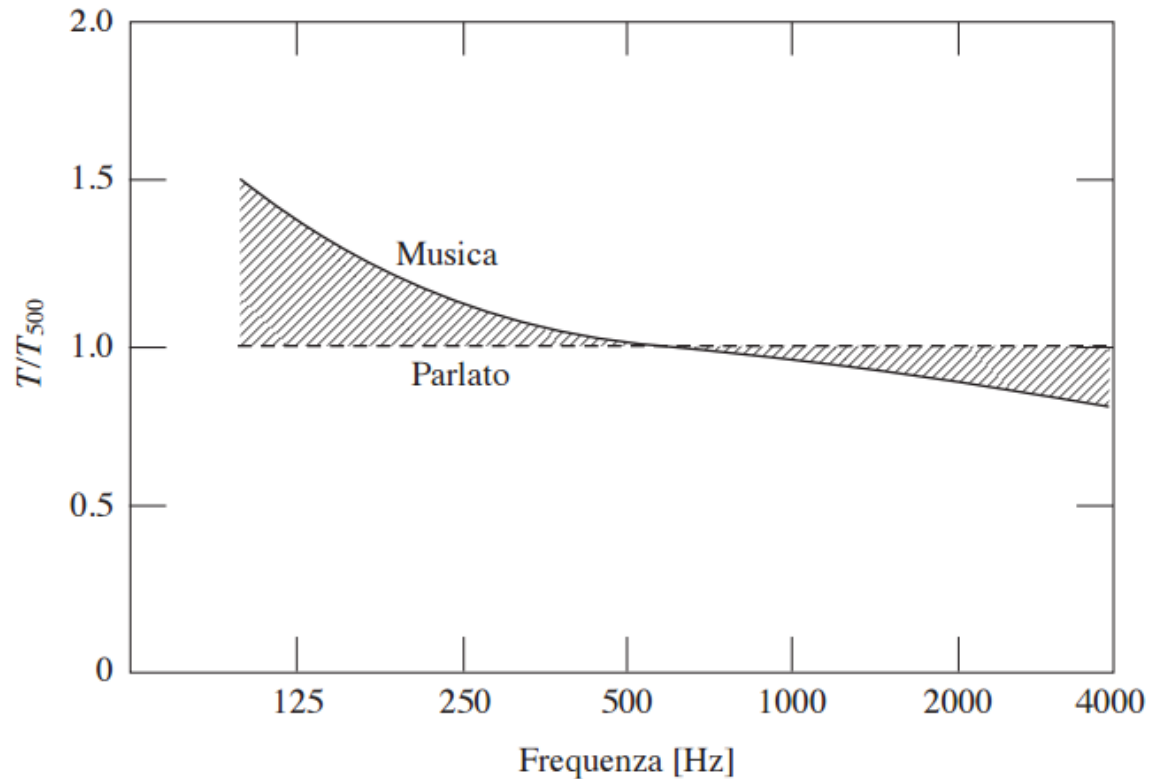


Andamento del tempo di riverberazione ottimale

Il tempo di riverberazione ottimale è **variabile in funzione della frequenza**, alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz.

Ambiente riverberante: correzione acustica applicando **pannelli fonoassorbenti**.

I materiali vanno scelti in modo da agire sulle frequenze alle quali il tempo di riverberazione risulta essere troppo elevato



Assorbimento acustico delle superfici

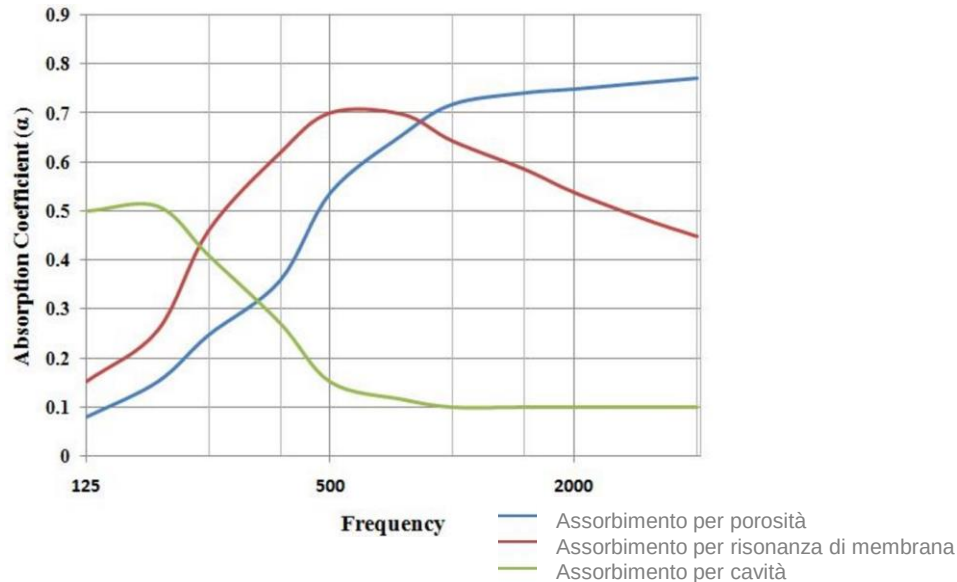
Materiali fonoassorbenti porosi

Andamento del coefficiente di assorbimento al variare dello spessore dello strato, o della distanza dalla parete rigida

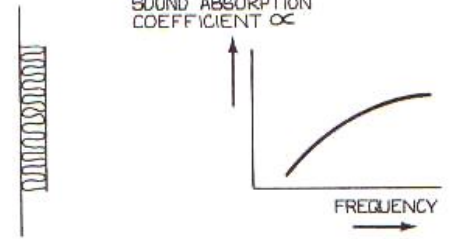
Pannelli rigidi forati e montati su materiale cedevole

Risuonatori acustici

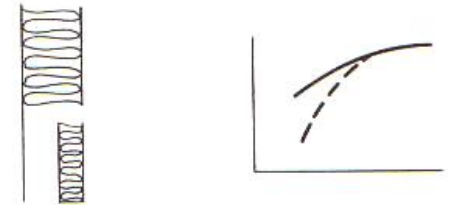
Andamento del coefficiente di assorbimento con la frequenza



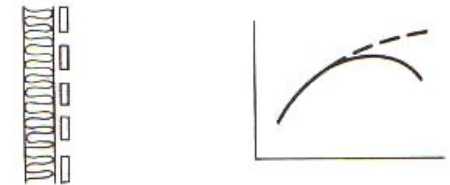
THIN POROUS MATERIAL



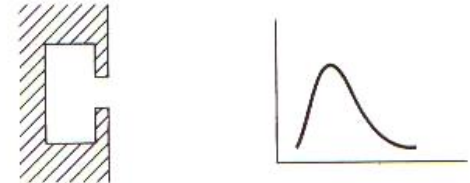
THICKER POROUS MATERIAL (OR WITH AIRSPACE)



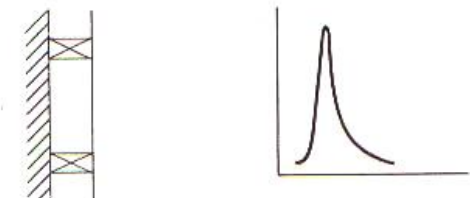
THIN POROUS MATERIAL WITH PERFORATED FACING



ENCLOSED VOLUME RESONATOR



VERY THIN MEMBRANE RESONATOR



Celle aperte vs Celle chiuse

Celle aperte: lana di vetro, lana di roccia

Buone qualità termiche

Buone qualità acustiche

Elevata permeabilità al vapore

Elevata igroscopicità

Perdita di potere isolante con aumento del contenuto d'acqua

Origine minerale

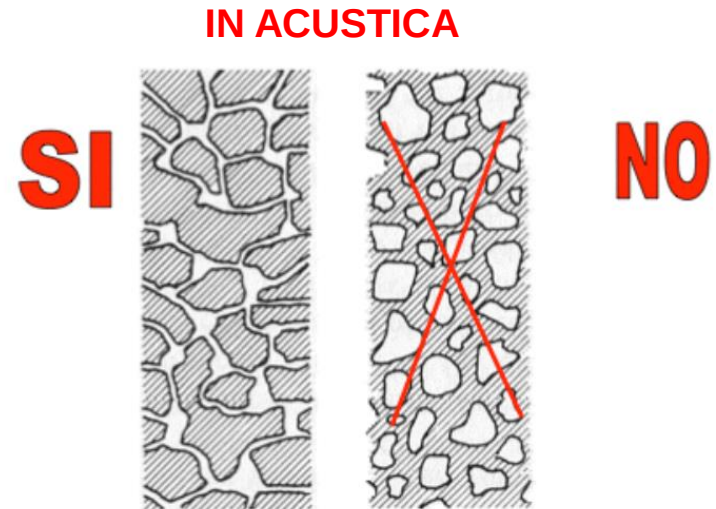
Celle chiuse: polistirene, poliuretano

Ottime qualità termiche

Impermeabile all'acqua

Bassa permeabilità al vapore

Origine sintetica



Gli isolanti a celle chiuse hanno una struttura costituita da piccole sfere contenenti **aria** al proprio interno. Quelli a celle o fibre aperte invece sono costituiti da fibre che confidano la loro capacità di isolamento intrappolando l'aria tra fibra e fibra; se tra le fibre si insinua acqua la capacità di isolamento si riduce notevolmente.

Per cui in prima approssimazione dove può esserci contatto con **acqua** meglio scegliere un isolante a celle chiuse come ad esempio per tetti o per applicazioni a cappotto, demandando i pannelli a fibre aperte per l'isolamento di soffitte o pareti a cassetta in cui la muratura esterna può proteggere dalle intemperie maggiormente rispetto al sottile strato di rasatura che rifinisce l'esterno dei cappotti.

Coefficienti di assorbimento

Tab. A.8

*Assorbimento globale di persone, oggetti di arredamento, ecc.
(da W. Furrer)*

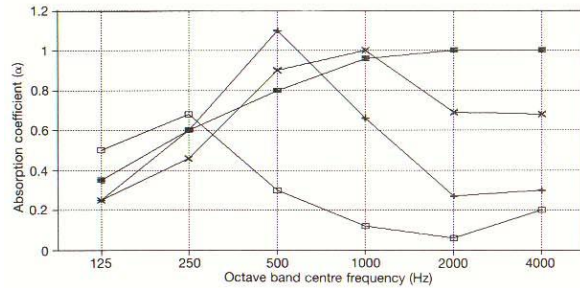
ELEMENTO	Assorbimento globale $A(m^2)$, alla frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Uditorio in piedi, o seduto su sedili di legno	0,15	0,3	0,5	0,55	0,6	0,5
Uditorio seduto, su sedili imbottiti	0,2	0,4	0,55	0,6	0,6	0,5
Orchestrale (con i loro strumenti)	0,4	0,8	1,0	1,4	1,3	1,2
Sedili per teatro, in legno (non occupati)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05
Sedili per teatro, imbottiti in stoffa	0,1	0,3	0,35	0,45	0,5	0,4
Sedili per teatro, imbottiti in cuoio	0,1	0,25	0,35	0,35	0,2	0,1

Tab. A.9

Coefficienti di assorbimento acustico di materiali vari (valori indicativi)

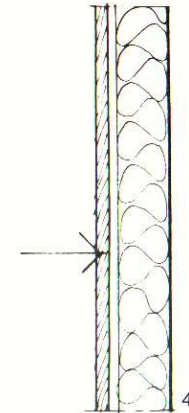
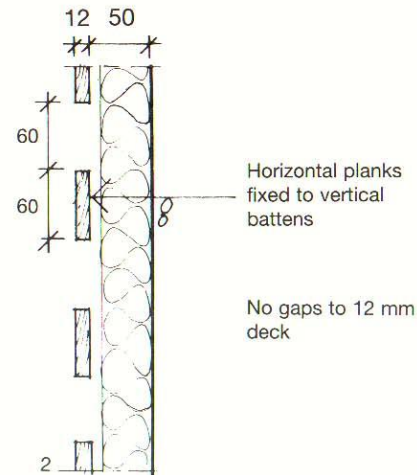
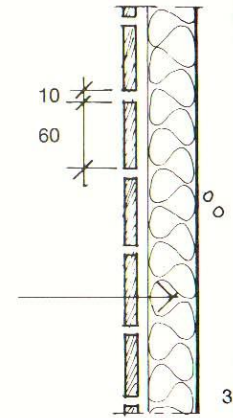
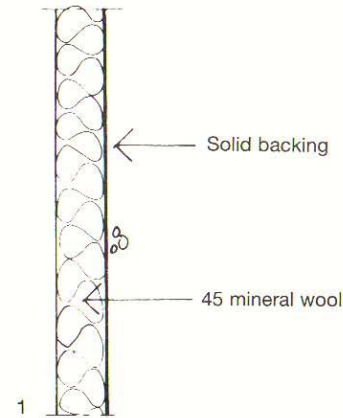
MATERIALE	Coefficienti di assorbimento alle frequenze (Hz):					
	125	250	500	1000	2000	4000
Parete intonacata	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Marmo lucidato	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Pavimento in marmette, o in cemento battuto	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Parquet di legno (su solaio rigido)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Pavimento in legno, su travetti	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07
Pavimento in linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Pavimento in gomma	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	0,08
Finestra, vetrata (comune)	0,30	0,20	0,15	0,10	0,07	0,04
Vetrata con lastra di vetro di medio spessore (finestra acustica)	0,15	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Tendaggi in cotone (300 g/m ²) a parete, non drappeggiati	0,03	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30
Tendaggi di velluto sottile poco drappeggiati	0,08	0,30	0,50	0,50	0,60	0,60
Tendaggi di velluto pesante fortemente drappeggiati	0,50	0,50	0,70	0,90	0,90	0,90
Tappeto sottile	0,05	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20
Tappeto pesante	0,10	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30
Intonaco acustico poroso (non verniciato) spessore 15 mm:						
minimo:	0,02	0,05	0,05	0,10	0,20	0,10
massimo:	0,10	0,10	0,30	0,20	0,30	0,20
Lana di vetro o di roccia, a parete, secondo lo spessore e il peso proprio:						
minimo:	0,10	0,40	0,60	0,75	0,80	0,80
massimo:	0,30	0,60	0,90	0,90	0,90	0,90
Pannello poroso di fibra di vetro o minerale, bachelizzata, secondo lo spessore e il montaggio:						
minimo:	0,10	0,30	0,50	0,60	0,70	0,80
massimo:	0,60	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90
Feltro soffic, secondo lo spessore (fra 1,2 cm e 5 cm):						
minimo:	0,02	0,04	0,01	0,20	0,55	0,90
massimo:	0,25	0,35	0,60	0,85	0,90	0,90
Pannello poroso in fibra di legno pressata, a parete	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
Pannelli in legno o legno compensato, con intercapedine fra pannello e parete, secondo lo spessore del pannello e della intercapedine:						
minimo:	0,20	0,10	0,05	0,03	0,03	0,03
massimo:	0,40	0,25	0,15	0,10	0,10	0,05
Soffitto sospeso, in gesso, sp. circa 25 mm	0,10	0,08	0,05	0,05	0,04	0,04
Lamierino di alluminio in strisce sagomate, forato per il 15% dell'area, con retrostante lana di vetro	0,50	0,75	0,75	0,85	0,75	0,70
Pannello in gesso forato per il 12% dell'area con retrostante lana di vetro.	0,40	0,60	0,80	0,60	0,60	0,50

Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



125	250	500	1000	2000	4000	Hz	Key
0.35	0.6	0.8	0.96	1.0	1.0	α	1
0.25	0.46	0.9	1.0	0.69	0.68	α	2
0.25	0.6	1.1	0.66	0.27	0.30	α	3
0.5	0.68	0.3	0.12	0.06	0.20	α	4

Wall panels can be designed to provide absorption over a narrow range of frequencies by adjusting the gap between planks. The principle of the slit resonator is the same as for a Helmholtz resonator, resonant frequency being dependent on slit width depth and cross-sectional area of the space behind the slits formed by the planks.

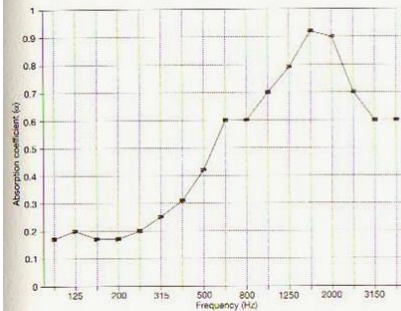


Source: W. Furrer

Wall panels

Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico

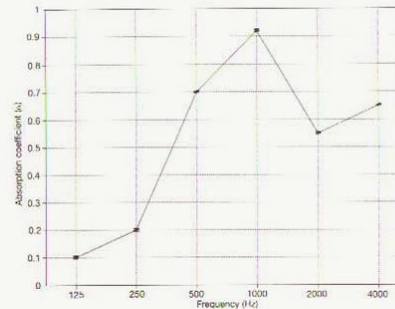
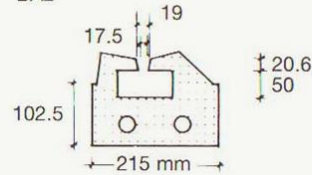
'Acoustic Bricks' by Blockleys Ltd., Telford
Type: BA1



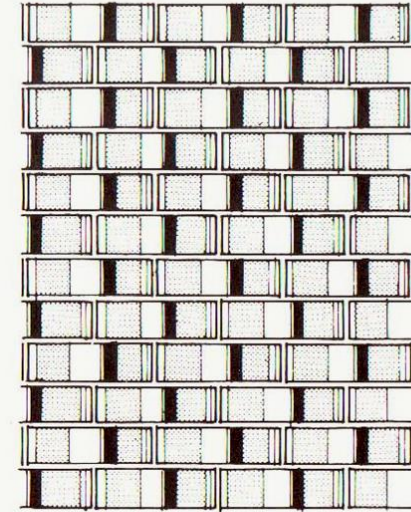
Absorption coefficient
of standard fairfaced
brickwork

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	Hz
0.17	0.2	0.17	0.17	0.2	0.3	0.31	0.42	0.6	0.6	0.7	0.79	0.92	0.9	0.7	0.6	0.6	α

BA2



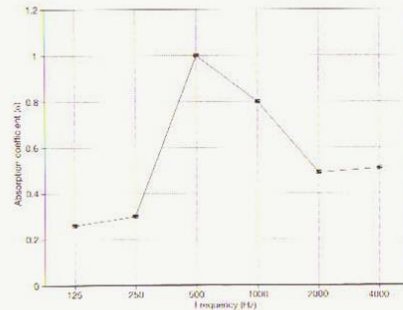
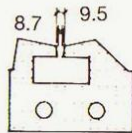
125	250	500	1000	2000	4000	Hz
0.1	0.2	0.7	0.92	0.55	0.65	α



Elevation

Scale 1:10

BA3



125	250	500	1000	2000	4000	Hz
0.26	0.3	1.0	0.8	0.49	0.51	α

Special design bricks may be considered to 'soften' the sound quality of a space where hard finishes are required. A mix of the three types will achieve good sound absorption in the range 500–2000 Hz. Angled faces help diffuse incident sound. More costly than slots between standard bricks, but advantageous in that wall retains some sound insulation value.

Sound
absorptive walling

Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



ASSORBIMENTO ACUSTICO

Frequenza Hz	125	250	500	1000	2000	4000	α_w 0.85	Classe B
Coefficiente d'assorbimento α	0.55	0.70	0.75	0.85	0.95	0.95		

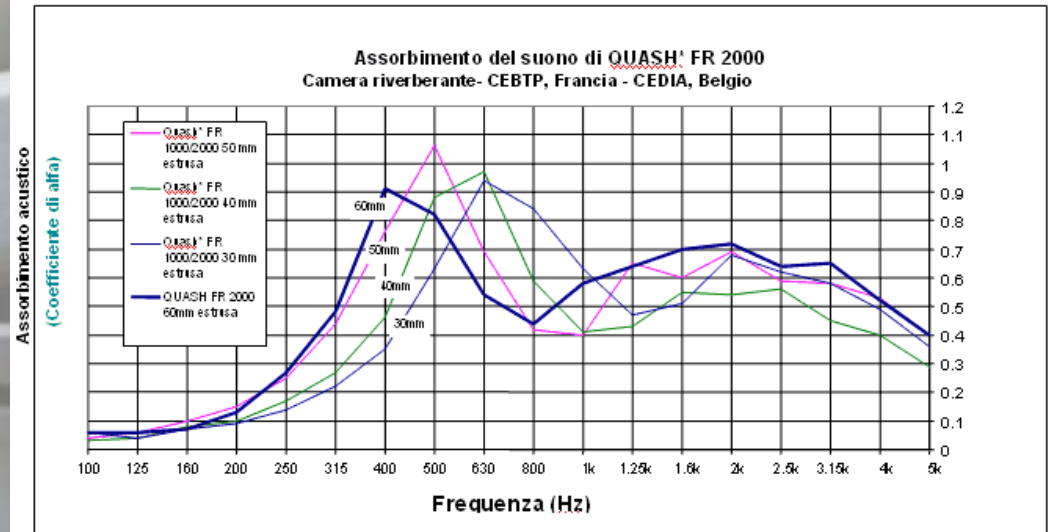
Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



Assorbimento della schiuma QUASH* Camera riverberante



Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



Controsoffitti acustici

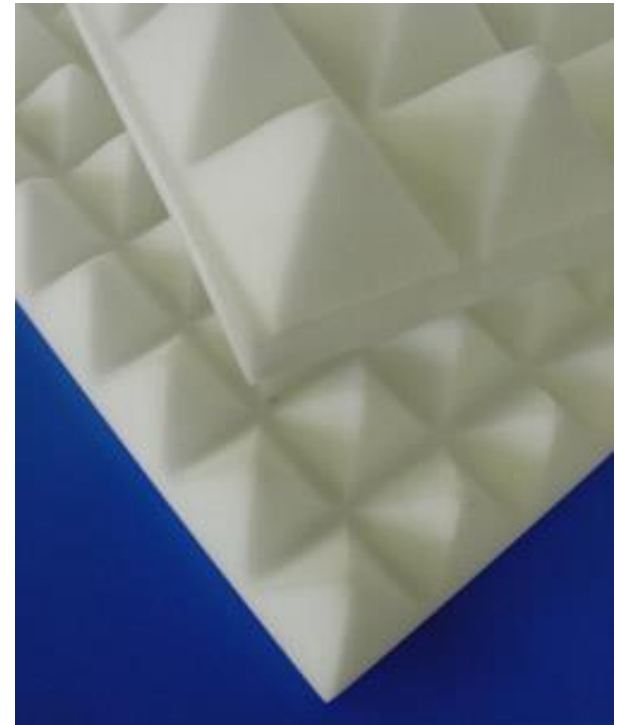
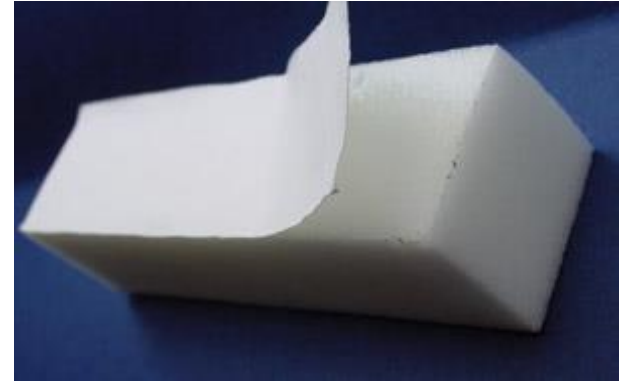


Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico



Materiali e sistemi costruttivi per l'assorbimento acustico

DATI TECNICI	
Densità (Kg/m ³)	8.5 – 11.5
Temperatura d'utilizzo	Max 150°C
Assorbimento acustico (sp. 50 mm/2000HZ)	>90%
Conduttività termica (10°C) DIN 52612	<0.035 W/m°K

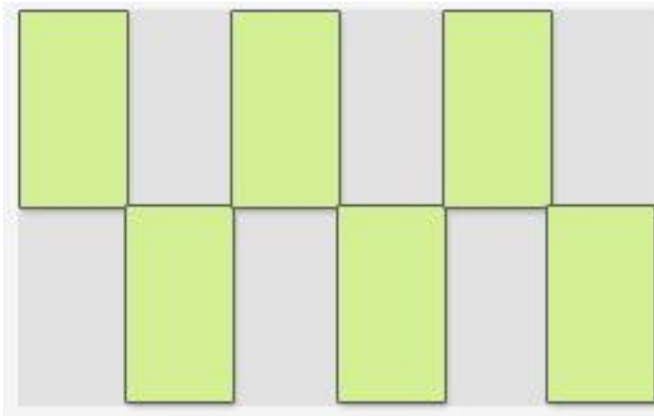


Scelta e posizionamento dei pannelli assorbenti

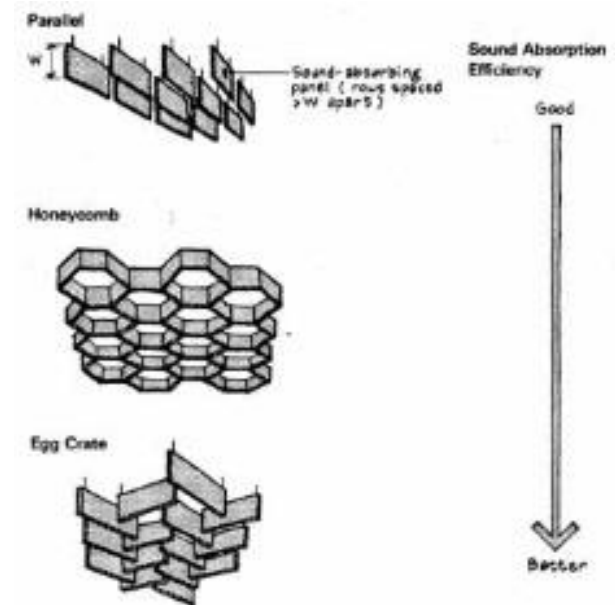
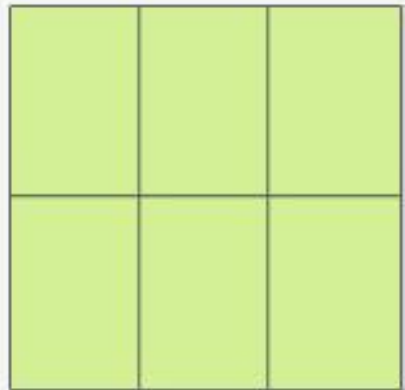
L'efficienza di un materiale fonoassorbente può variare in base a distribuzione e posizionamento in una stanza (Area effect). Dei pannelli posizionati a scacchiera risulteranno più efficienti di altri, in pari superficie, disposti in maniera uniforme. Ciò è dovuto al fatto che i bordi dei pannelli generano fenomeni di diffrazione oltre che offrire maggiore superficie fonoassorbente. Questo fenomeno si verifica anche in 3d (vedi baffles o egg crate).

Criterio base: **DIVERSI e DISTRIBUITI**

PIU' EFFICIENTE



MENO EFFICIENTE



Acustica e illuminotecnica

Esercitazione

Marco Frascarolo, ing, PHD

Università degli Studi di Roma Tre

Dipartimento di Architettura

14 Marzo 2016

Decibel e livello di pressione sonora

Intensità e potenze sonore associate ai fenomeni che l'orecchio umano può percepire hanno un'**ampia** dinamica:

- 1 pW/m² pico = 10⁻¹² (soglia dell'udibile) ÷ 1 W/m² (soglia del dolore)
- 20 µPa micro = 10⁻⁶ (soglia dell'udibile) ÷ 20 Pa (soglia del dolore)

Dall'analisi di questi aspetti percettivi, si nota che il campo di valori entro il quale la pressione sonora può variare risulta assai ampio, estendendosi su oltre sei (dodici) ordini di grandezza. La variazione di tali grandezze è rappresentata in **scala logaritmica** anzichè su scala lineare perché:

- Permette di evitare l'oggettiva difficoltà nel trattare un così vasto intervallo di valori, dai molto piccoli ai molto grandi;
- L'enorme capacità dinamica dell'apparato uditivo suggerisce una risposta organizzata più in termini logaritmici che non lineari.

L'introduzione della scala logaritmica consente di confrontare i valori delle grandezze in esame con valori convenzionali della stessa grandezza assunti come riferimento. Si introduce il concetto di **livello** della grandezza in esame, ovvero il livello rispetto al valore di riferimento della stessa grandezza. Il **decibel (dB)** esprime appunto questo rapporto, e pur rappresentando una quantità adimensionale, nella pratica comune è ormai trattato come una unità di misura vera e propria.

Livello di Pressione Sonora

$$L_p = 20 \log_{10} P / P_0 \text{ (dB)}$$

$P_0 = 20 \text{ µPa}$ corrispondente al valore della soglia normale di udibilità a 1000 Hz

Altre grandezze acustiche

Livello di potenza sonora

$$L_W = 10 \log_{10}(W/W_0)$$

$$W_0 = 10^{-12} \text{ Watt}$$

Livello di intensità sonora

$$L_J = 10 \log_{10} (J/J_0)$$

$$J_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Livello di densità di energia sonora

$$L_D = 10 \log_{10} (D/D_0)$$

$$J_0 = 3 \cdot 10^{-15} \text{ J/m}^3$$

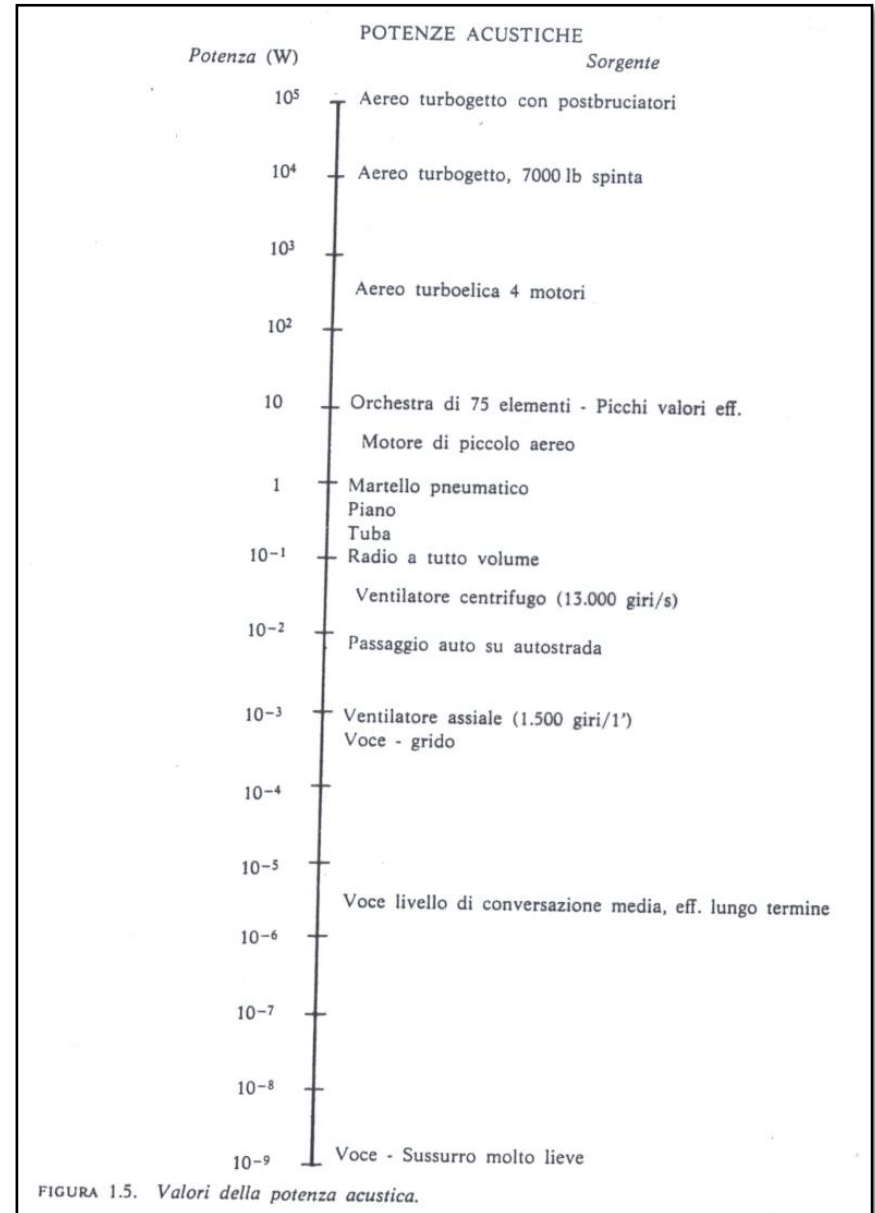
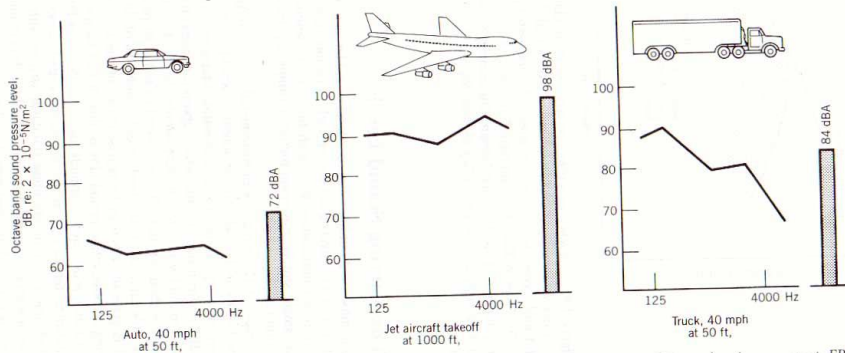


FIGURA 1.5. Valori della potenza acustica.

Scala lineare vs scala logaritmica

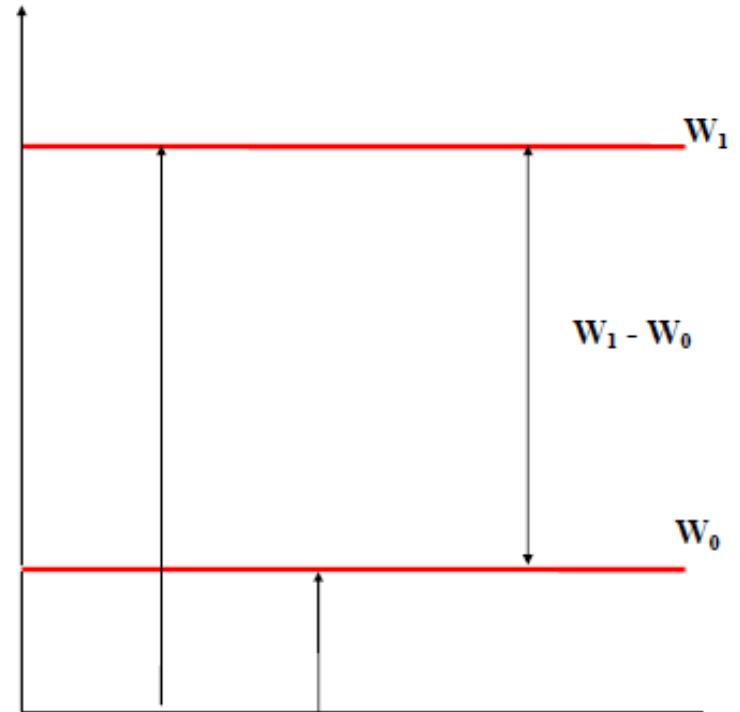
Livello di potenza (scala lineare):

$$W_1 - W_0 \text{ [Watt]}$$

Livello di potenza (scala logaritmica):

$$\log_{10} W_1 - \log_{10} W_0 = \log_{10} W_1/W_0 \text{ [Bel]}$$

$$L_w = 10 \log_{10} W_1/W_0 \text{ [dB]}$$



Composizione di livelli sonori

$$\left. \begin{aligned} L_{J1} &= 10 \log_{10} (J_1/J_0) \\ L_{J2} &= 10 \log_{10} (J_2/J_0) \end{aligned} \right\}$$

$$L_T = 10 \log_{10} (J_1 + J_2)/J_0$$

Se $L_{J1} = L_{J2}$

$$L_T = 10 \log_{10} [(J_1 + J_2)/J_0] = 10 \log_{10} (2J_1/J_0) = 10 \log_{10} (J_1/J_0) + 10 \log_{10} 2 = L_{J1} + 3 \text{ dB}$$

$$L_T = L_{J1} + 3 \text{ dB}$$

$$L_{J1} = 10 \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$L_{J2} = 10 \log_{10} (J_2/J_0)$$

Se $L_{J1} \neq L_{J2} \neq L_{J3} \neq L_{J4} \neq \dots$

$$L_{J1}/10 = \log_{10} (J_1/J_0)$$

$$10^{L_{J1}/10} = J_1/J_0$$

$$J_1 = J_0 \cdot 10^{L_{J1}/10}$$

$$L_{J2}/10 = \log_{10} (J_2/J_0)$$

$$10^{L_{J2}/10} = J_2/J_0$$

$$J_2 = J_0 \cdot 10^{L_{J2}/10}$$

$$L_T = 10 \log_{10} [(J_0 \cdot 10^{L_{J1}/10} + J_0 \cdot 10^{L_{J2}/10})/J_0] = 10 \log_{10} (10^{L_{J1}/10} + 10^{L_{J2}/10})$$

$$L_T = 10 \log_{10} \sum 10^{L_i/10}$$

Esercizio 1

Calcolare il livello risultante dalla sovrapposizione dei seguenti livelli sonora:

- a. $L_1 = 80 \text{ dB}$ $L_2 = 80 \text{ dB}$
- b. $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = 65 \text{ dB}$
- c. $L_1 = 80 \text{ dB}$ $L_2 = 70 \text{ dB}$
- d. $L_1 = 70 \text{ dB}$ $L_2 = 50 \text{ dB}$

Esercizio 2

Noti i seguenti livelli di pressione sonora:

- $L_1 = 70 \text{ dB}$
- $L_2 = 65 \text{ dB}$
- $L_3 = 63 \text{ dB}$
- $L_4 = 50 \text{ dB}$

determinare:

- a. la media energetica
- b. la media aritmetica
- c. la media energetica nel tempo
 - $L_1 = 70 \text{ dB}$ $t_1 = 2\text{h}$
 - $L_2 = 65 \text{ dB}$ $t_2 = 1\text{h}$
 - $L_3 = 63 \text{ dB}$ $t_3 = 1\text{h}$
 - $L_4 = 50 \text{ dB}$ $t_4 = 12\text{h}$

Acustica e illuminotecnica

Esercitazione

Marco Frascarolo, ing, PHD

Università degli Studi di Roma Tre

Dipartimento di Architettura

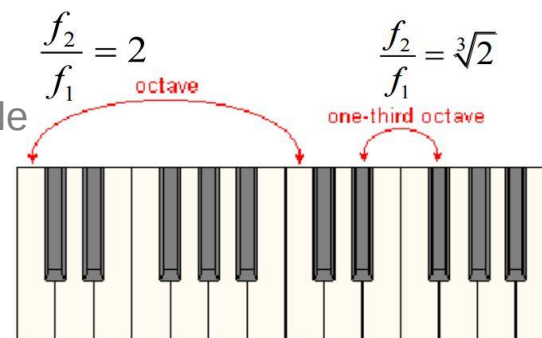
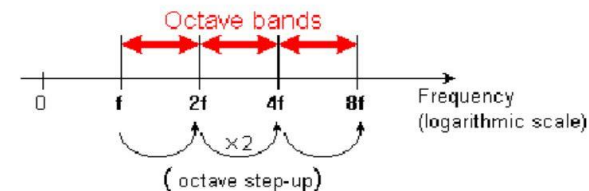
14 Marzo 2016

Bande d'ottava e bande di terzi d'ottava

La banda di frequenza udibile è piuttosto vasta (da **20 a 20.000 Hz**) e pertanto è opportuno suddividerla in sottointervalli di minore ampiezza.

Dall'acustica musicale si utilizzano le **bande di ottava**, nelle quali il rapporto fra la frequenza superiore e quella inferiore è pari a 2 .

Si usano spesso le **bande a terzi di ottava** nelle quali il rapporto fra le frequenze massima e minima è pari a $2^{1/3}$.



Banda di ottava

$$f_2 = 2 f_1$$

Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite		Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite	
	inferiore (Hz)	superiore (Hz)		inferiore (Hz)	superiore (Hz)
16	11,2	22,4	1000	710	1400
31,5	22,4	45	2000	1400	2800
63	45	90	4000	2800	5600
125	90	180	8000	5600	11200
250	180	355	16000	11200	22400
500	355	710			

Alla frequenza centrale di ogni banda si attribuisce tutta l'energia contenuta nell'intera banda.

Banda di terzi d'ottava

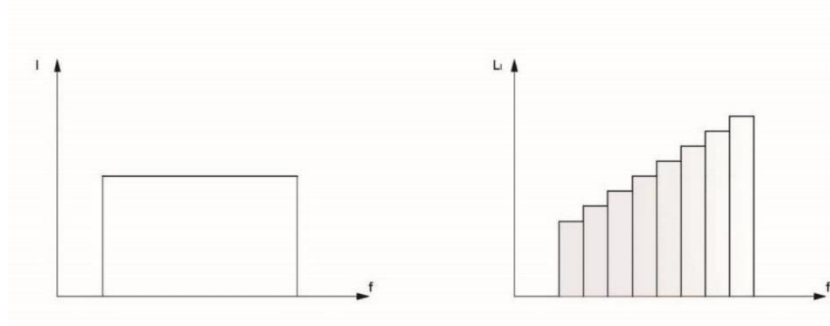
$$f_2 = 2^{1/3} f_1 = 1,260 f_1$$

N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenze limiti		N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenze limiti	
		inferiore (Hz)	superiore (Hz)			inferiore (Hz)	superiore (Hz)
12	16	14,3	18	28	630	560	710
13	20	18	22,4	29	800	710	900
14	25	22,4	28	30	1000	900	1120
15	31,5	28	35,5	31	1250	1120	1400
16	40	35,5	45	32	1600	1400	1800
17	50	45	56	33	2000	1890	2240
18	63	56	71	34	2500	2240	2800
19	80	71	90	35	3150	2800	3550
20	100	90	112	36	4000	3550	4500
21	125	112	140	37	5000	4500	5600
22	160	140	180	38	6300	5600	7100
23	200	180	224	39	8000	7100	9000
24	250	224	280	40	10000	9000	11200
25	315	280	355	41	12500	11200	14000
26	400	355	450	42	16000	14000	18000
27	500	450	560	43	20000	18000	22400

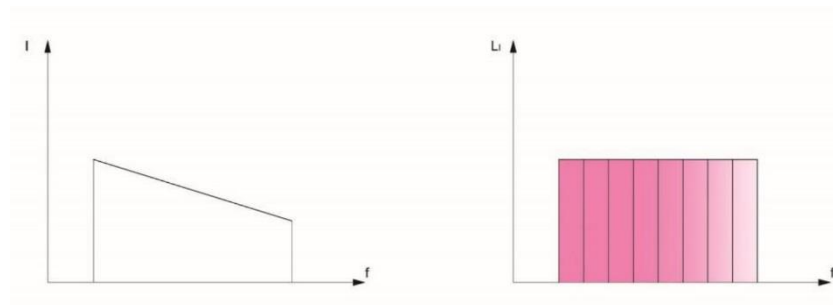
bande	ottava			1/3 d'ottava		
	taglio inf.	centrale	taglio sup.	taglio inf.	centrale	taglio sup.
frequenza (Hz)	44	63	88	56,2	63	70,8
				70,8	80	89,1
				89,1	100	112
				112	125	141
				141	160	178
				178	200	224
				224	250	282
	177	250	355	282	315	355
				355	400	447
				447	500	562
	355	500	710	562	630	708
				708	800	891
				891	1000	1122
	710	1000	1420	1122	1250	1413
				1413	1600	1778
				1778	2000	2239
	1420	2000	2840	2239	2500	2818
				2818	3150	3548
				3548	4000	4467
	2840	4000	5680	4467	5000	5623
				5623	6300	7079
				7079	8000	8913
	5680	8000	11360	8913	10000	11220
				11220	12500	14130

Rumore bianco e rumore rosa

Rumore bianco: distribuzione spettrale delle intensità costante a tutte le frequenze che dà luogo ad una distribuzione crescente dei livelli con le frequenze per l'aumento dell'ampiezza di banda. Visto che ogni banda d'ottava ha ampiezza doppia rispetto alla banda precedente, l'incremento che si verifica è di 3dB/ottava, in quanto 3dB significano un raddoppio dell'energia.



Rumore rosa: particolare tipo di rumore in cui le componenti a bassa frequenza hanno intensità maggiore. Distribuzione spettrale delle intensità decrescente all'aumentare delle frequenze con una pendenza negativa di -3 dB/ottava. Si hanno livelli costanti alle varie bande

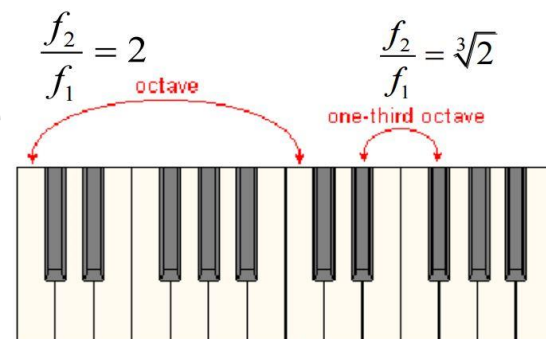
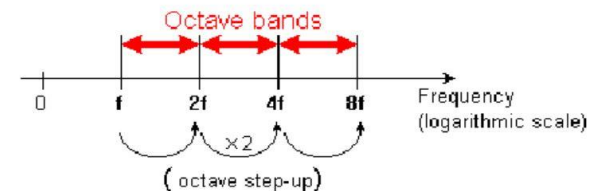


Bande d'ottava e bande di terzi d'ottava

La banda di frequenza udibile è piuttosto vasta (da 20 a 20.000 Hz) e pertanto è opportuno suddividerla in sottointervalli di minore ampiezza.

Dall'acustica musicale si utilizzano le bande di ottava, nelle quali il rapporto fra la frequenza superiore e quella inferiore è pari a 2 .

Si usano spesso le bande a terzi di ottava nelle quali il rapporto fra le frequenze massima e minima è pari a $2^{1/3}$.



Banda di ottava

$$f_2 = 2 f_1$$

Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite		Frequen. nomin. (Hz)	Frequenza limite	
	inferiore (Hz)	superiore (Hz)		inferiore (Hz)	superiore (Hz)
16	11,2	22,4	1000	710	1400
31,5	22,4	45	2000	1400	2800
63	45	90	4000	2800	5600
125	90	180	8000	5600	11200
250	180	355	16000	11200	22400
500	355	710			

Alla frequenza centrale di ogni banda si attribuisce tutta l'energia contenuta nell'intera banda.

Banda di terzi d'ottava

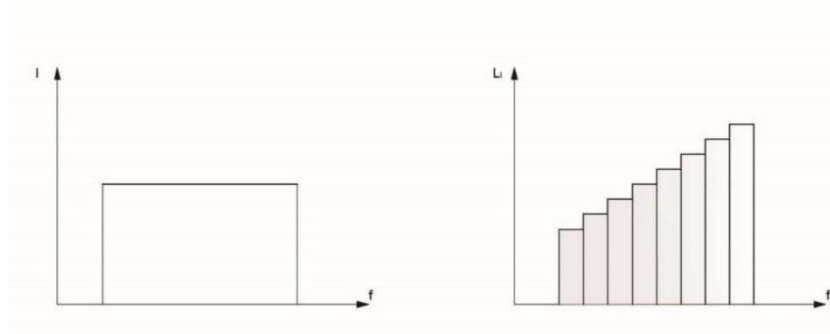
$$f_2 = 2^{1/3} f_1 = 1,260 f_1$$

N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenze limiti		N. d'ordine	Frequen. nomin. (Hz)	Frequenze limiti	
		inferiore (Hz)	superiore (Hz)			inferiore (Hz)	superiore (Hz)
12	16	14,3	18	28	630	560	710
13	20	18	22,4	29	800	710	900
14	25	22,4	28	30	1000	900	1120
15	31,5	28	35,5	31	1250	1120	1400
16	40	35,5	45	32	1600	1400	1800
17	50	45	56	33	2000	1890	2240
18	63	56	71	34	2500	2240	2800
19	80	71	90	35	3150	2800	3550
20	100	90	112	36	4000	3550	4500
21	125	112	140	37	5000	4500	5600
22	160	140	180	38	6300	5600	7100
23	200	180	224	39	8000	7100	9000
24	250	224	280	40	10000	9000	11200
25	315	280	355	41	12500	11200	14000
26	400	355	450	42	16000	14000	18000
27	500	450	560	43	20000	18000	22400

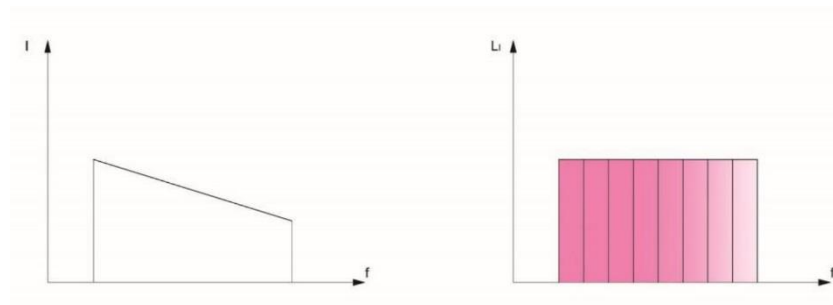
bande	ottava			1/3 d'ottava		
	taglio inf.	centrale	taglio sup.	taglio inf.	centrale	taglio sup.
frequenza (Hz)				56,2	63	70,8
	44	63	88	70,8	80	89,1
				89,1	100	112
				112	125	141
	88	125	177	141	160	178
				178	200	224
				224	250	282
	177	250	355	282	315	355
				355	400	447
				447	500	562
	355	500	710	562	630	708
				708	800	891
				891	1000	1122
	710	1000	1420	1122	1250	1413
				1413	1600	1778
				1778	2000	2239
	1420	2000	2840	2239	2500	2818
				2818	3150	3548
				3548	4000	4467
	2840	4000	5680	4467	5000	5623
				5623	6300	7079
				7079	8000	8913
	5680	8000	11360	8913	10000	11220
				11220	12500	14130

Rumore bianco e rumore rosa

Rumore bianco: distribuzione spettrale delle intensità costante a tutte le frequenze che dà luogo ad una distribuzione crescente dei livelli con le frequenze per l'aumento dell'ampiezza di banda. Visto che ogni banda d'ottava ha ampiezza doppia della banda precedente, l'incremento che si verifica è di 3dB/ottava, in quanto 3dB significano un raddoppio dell'energia.



Rumore rosa: particolare tipo di rumore in cui le componenti a bassa frequenza hanno intensità maggiore. Distribuzione spettrale delle intensità decrescente all'aumentare delle frequenze con una pendenza negativa di -3 dB/ottava. Si hanno livelli costanti alle varie bande



Esercizio 1 - Calcolo del tempo di riverberazione

Calcolare il tempo di riverberazione a 500 Hz di un ambiente con le seguenti caratteristiche:

Volume $V = 324 \text{ m}^3$

Pareti	Superficie totale $S_0 = 122 \text{ m}^2$ Coefficiente di assorbimento acustico medio $\alpha_0 = 0.03$ (a 500 Hz)
--------	---

Soffitto	Superficie $S_s = 98 \text{ m}^2$ Coefficiente di assorbimento acustico medio $\alpha_s = 0.8$ (a 500 Hz)
----------	--

Pavimento	Superficie $S_p = 98 \text{ m}^2$ Coefficiente di assorbimento acustico $\alpha_p = 0.06$ (a 500 Hz)
-----------	---

Soluzione

Il coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente risulta:

$$\alpha_{\text{med}} = \sum S_i \alpha_i / \sum S_i = (122 \cdot 0,03 + 98 \cdot 0,8 + 98 \cdot 0,06) / (122 + 98 + 98) = 87,94 / 318 = 0,28$$

Applicando la formula di Sabine per il tempo di riverberazione:

$$Tr = 0,16 V/A = 0,16 V/(\alpha_{\text{med}} S_{\text{totale}}) = 0,16 V/(\alpha_i S_i) = 0,161 \cdot 324 / (122 \cdot 0,03 + 98 \cdot 0,8 + 98 \cdot 0,06) =$$

$$Tr = 0,59 \text{ sec}$$

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Si consideri una sala cinematografica con le seguenti dimensioni:

Area in pianta $10 \times 18 \text{ m} = 180 \text{ mq}$

Altezza 6 m

Volume 1080 mc

Attraverso l'emissione di un rumore rosa e le relative misure dei tempi di riverberazione, si elaborano con i software i seguenti valori di T_{20} alle varie frequenze:

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
T_{20}	1,323	1,159	1,010	1,036	0,941

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 1 – Calcolo delle aree di assorbimento equivalenti (a.a.e.) dello stato di fatto

Dalla formula di Sabine ($T_r = 0,16 V/A$) troveremo le a.a.e. corrispondenti a ciascuna frequenza, utilizzando per ciascuna il relativo valore di T_{20} . Si usa la formula inversa di Sabine.

$$A = 0,16 * V / T_{20} \quad [\text{mq}]$$

Alla frequenza 500 Hz si ha: $A = 0,16 * V / T_{20} = 0,16 * 1080 / 1,010 = 171,09 \quad [\text{mq}]$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e. originarie (mq)	130,61	149,09	171,09	166,79	183,63

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 2 – Calcolo delle a.a.e. ottimale

Supponiamo che il $T_{20 \text{ ottimale}}$ sia 0,5 sec per tutte le frequenze (cinematografo)

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
$T_{20 \text{ ottimale}}$ (s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Se si deve arrivare ad un T_r di 0,5 s partendo da un T_{20} di 1,01 s (a 500 Hz), occorrerà aggiungere le a.a.e. mancanti, in modo che la formula di Sabine calcolata con le a.a.e. attuali più le a.a.e. aggiuntive restituisca il tempo di riverberazione ottimale che abbiamo fissato.

Si calcola la A relativa al $T_{20 \text{ ottimale}}$:

$$A = 0,16 \cdot V / T_{20 \text{ ottimale}} = 0,16 \cdot 1080 / 0,5 = 345,6 \text{ mq}$$

Essa corrisponde alle a.a.e. ottimali che dovranno essere impiegate nella sala. Si sta calcolando sempre nella frequenza di 500 Hz, ma proprio perché è una frequenza centrale/base, le a.a.e. ottimali trovate sono assunte valide per tutte le altre frequenze:

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 3 – Calcolo delle a.a.e. da aggiungere

Le a.a.e. da aggiungere sono quelle che si dovranno avere alla fine (cioè 345.6 mq) meno quelle che già il locale ha, cioè le a.a.e. esistenti, ricavate più sopra col valore del tempo di riverbero.

Considerando le a.a.e. già presenti all'interno della sala, si calcola il numero di a.a.e. da aggiungere:

$$\text{a.a.e. da aggiungere} = 345,6 - 171,09 = 174.51 \text{ mq (a 500 Hz)}$$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e da aggiungere (mq)	214,99	196,50	174,51	178,80	161,97

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 4 – Calcolo delle a.a.e. ottimali

A questo punto si va a cercare il materiale fonoassorbente in modo da rilevare il coefficiente di assorbimento acustico indicato alle varie frequenze. Una volta scelto il materiale, resta da stabilire quanta superficie di questo materiale dovremo utilizzare.

Scegliamo come materiale un pannello in lana di roccia Rockfon, che presenta i seguenti coefficienti di assorbimento alle varie frequenze:

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
Coefficiente di assorbimento Rockfon α	0,5	0,85	1	0,9	1

La regola è metterlo a punto alle frequenze intermedie, 500 e 1000 Hz. Come si vede dalla tabella qui sopra, in corrispondenza di queste frequenze il coefficiente di assorbimento è praticamente 1. In tal caso le a.a.e. sono circa uguali ai mq di materassino da mettere.

Si decide dunque di aggiungere nel locale 175 mq di superficie fonoassorbente (pannelli Rockfon).

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 5 – Calcolo assorbimento aggiuntivo

Si calcola l'assorbimento aggiuntivo che il nuovo materiale sta introducendo. Moltiplichiamo la superficie (175 mq per tutto il locale) per il coefficiente di assorbimento di ciascuna frequenza del materiale prescelto.

Assorbimento aggiuntivo = $175 \times 1 = 175$ mq (a 500 Hz)

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
Assorbimento aggiuntivo dovuto a 175 mq di materiale fonoassorbente	87,5	148,75	175	157,5	175

a.a.e. totali finali = $171,09 + 175 = 346,09$ mq (a 500 Hz)

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
a.a.e. totali finali (mq)	218,11	297,84	346,09	324,29	358,63

Il valore ottimale che bisognava ottenere di circa 345.6 è vero a 500 Hz, è quasi vero a 2000 Hz ed è meno vero alle basse frequenze dove di solito ci sono più problemi.

Esercizio 2 - Calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione ottimale

Quesito 6 – Verifica T_{20} dopo l'intervento

Occorre adesso verificare il tempo di riverberazione dopo l'intervento correttivo.

$$T_{20 \text{ finale}} = 0,16 V/A_{\text{finali}} = 0,16 \cdot 1080 / 346,09 \text{ (a 500 Hz)}$$

Frequenza (Hz)	125	250	500	1000	2000
$T_{20 \text{ finale}}$	0,792	0,580	0,499	0,533	0,482

Tempo di Riverbero T20 (s)

