



Università degli studi di
Padova



ACUSTICA ARCHITETTONICA

Corso di Acustica applicata

Renato Lazzarin

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei
Sistemi industriali

Riflessione ed assorbimento

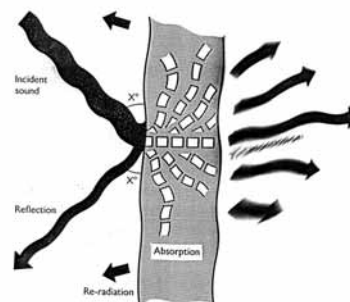
Quando l'onda sonora incontra un ostacolo, può essere riflessa, trasmessa o assorbita. Anche se la superficie è rigida ed impervia al passaggio dell'aria, una frazione per quanto piccola viene sempre assorbita. Date le quote incidente E_i , assorbita E_a e trasmessa E_t , il coefficiente di assorbimento acustico apparente α è dato da:

$$\alpha = \frac{E_a + E_t}{E_i}$$

Il coefficiente può assumere valori variabili fra 0,01 ed 1. Per valore 1 non si ha riflessione, è come se l'onda incidesse su di una finestra aperta.

Il potere fonoassorbente di una parete è dato da:

$$a = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_m S \quad \alpha_m = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S}$$



Il potere fonoassorbente viene misurato in m² di finestra aperta ovvero nel sistema anglosassone in *sabin* (ft² di *open window*).

Il coefficiente di assorbimento dipende dall'angolo di incidenza, dalle frequenze del suono incidente e dalla conformazione del materiale sia in superficie che internamente.

Per quanto riguarda la direzionalità, in un ambiente chiuso si hanno onde sonore incidenti da tutte le direzioni ed è a questo campo riverberante o diffuso che ci si riferisce, tabulando il coefficiente.

Per la variazione con la frequenza a volte ci si riferisce al coefficiente NRC (*Noise Reduction Coefficient*) media a 250-500-1000-2000 Hz.

E' un'approssimazione non accettabile e bisognerebbe conoscere l'assorbimento almento in banda di ottava.

Materiali fonoassorbenti

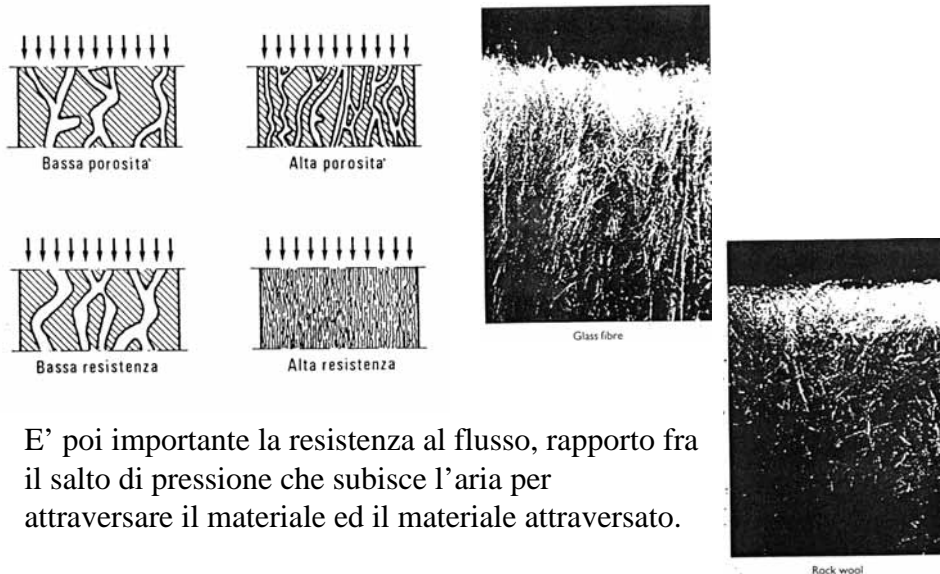
I materiali impiegati nell'edilizia si possono classificare come:

- impermeabili rigidi;
- porosi rigidi;
- porosi flessibili;
- impermeabili flessibili.

Una parete impermeabile rigida (pareti con intonaco, pavimenti in marmo o piastrelle), non è mai perfettamente riflettente, sia perchè la rigidità non è mai completa, sia perchè la ruvidità della superficie favorisce l'assorbimento; inoltre una piccola quantità di energia sonora viene dissipata fra la superficie e gli strati d'aria compressi e rarefatti prossimi ad essa. Ad esempio per una parete intonacata si ha:

f	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,003

Per un materiale poroso (strato di fibre minerali spruzzato su supporto rigido) è importante la porosità, rapporto fra spazio vuoto e volume totale.



E' poi importante la resistenza al flusso, rapporto fra il salto di pressione che subisce l'aria per attraversare il materiale ed il materiale attraversato.

E' anche importante la disposizione dei pori nel materiale:

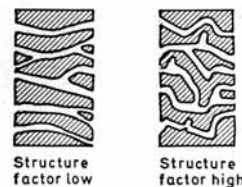
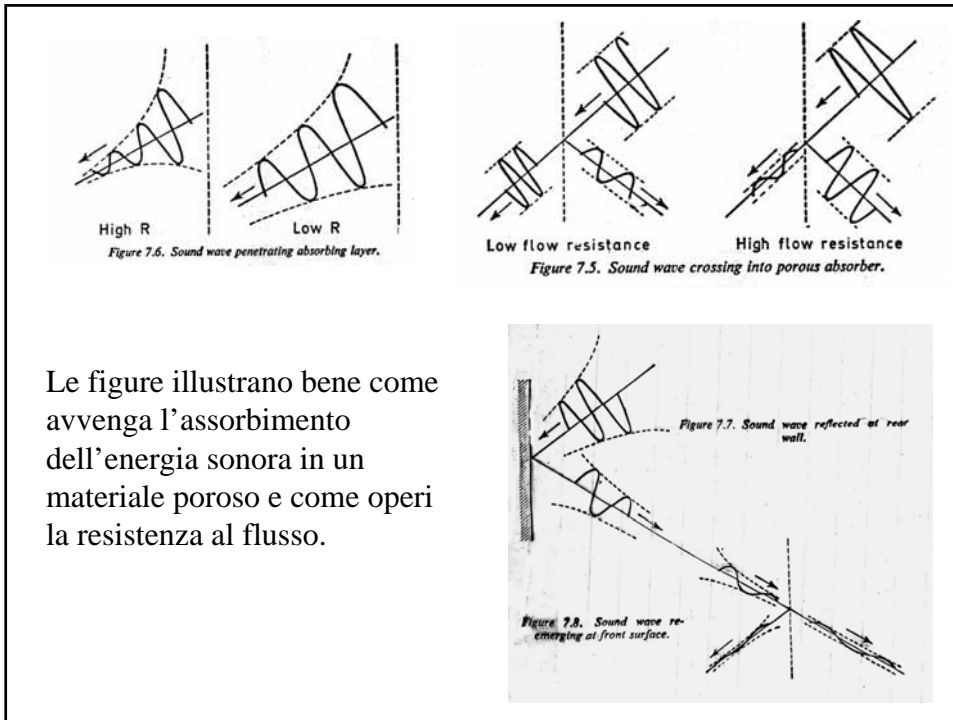


Figure 7.4. Variation of structure factor. Porosity and flow resistance held constant.

Un elemento con elevato assorbimento deve possedere un'elevata trasparenza acustica. E' questa che consente alla vibrazione di penetrare nel materiale dove l'energia sonora viene dissipata per attrito. Questa dissipazione richiede una maggiore resistenza al flusso che però diminuisce la trasparenza: si tratta in altri termini di caratteristiche contrastanti. L'unica strada da seguire è quella di aumentare lo spessore di materiale.

All'aumentare della frequenza del suono incidente, il materiale viene interessato da onde sonore di minore lunghezza d'onda, di fronte alle quali presenta una trasparenza acustica crescente.



Le figure illustrano bene come avvenga l'assorbimento dell'energia sonora in un materiale poroso e come operi la resistenza al flusso.

Con la frequenza aumenta anche lo spessore ottimale di materiale, dato che la frazione di energia entrante da dissipare è più elevata. Per un materiale di questo tipo va evitato qualunque trattamento superficiale che possa ostruire i pori.

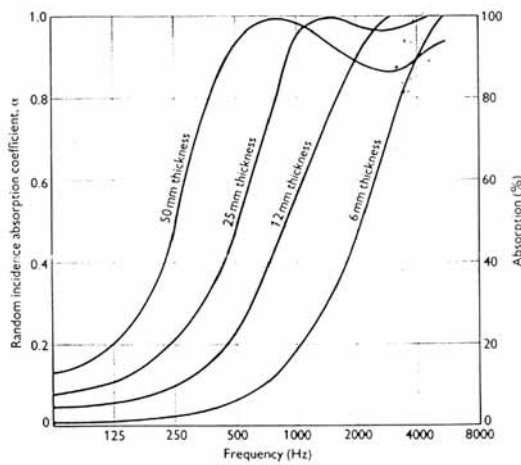
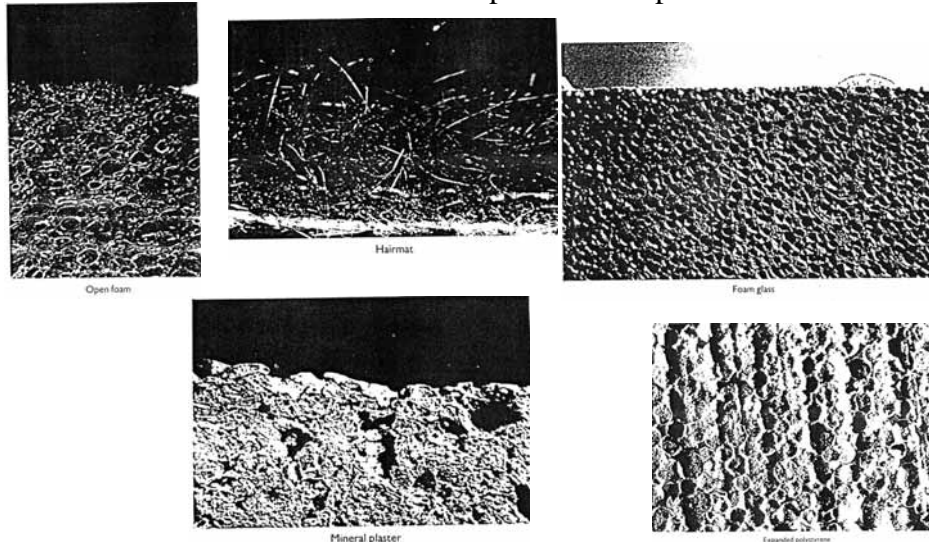


Figure 3.15 Porous Absorber — Effect of Thickness

Spesso si dice che gli isolanti termici sono buoni materiali fonoassorbenti: non è sempre vero. Lo è per gli isolanti a fibre o celle aperte come la lana di vetro o di roccia. Non lo è per gli isolanti a celle chiuse come la schiuma di vetro o il polistirolo espanso.



E' possibile l'incremento e la modifica dell'assorbimento acustico mediante montaggio dell'elemento fonoassorbente ad una certa distanza da un supporto rigido. L'intervento acquista la massima efficacia ad una spaziatura pari a $1/4\lambda$. Infatti la parte rigida è un punto nodale per cui a $1/4\lambda$ si ha ampiezza massima di vibrazione. In compenso attenzione che per lunghezze d'onda per le quali l'elemento si trovi a $1/2 \lambda$ dal supporto rigido l'efficacia dell'assorbimento è notevolmente ridotta.

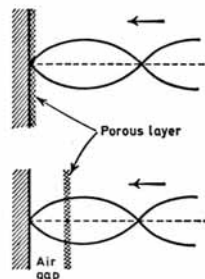


Figure 7.12. Effect of spacing porous layer away from wall.

E' importante sottolineare ancora una volta come lo spessore da scegliere sia legato alla resistenza al flusso per una certa frequenza, tenendo presente che al crescere della frequenza la resistenza al flusso tende a diminuire.

Material	r (M.K.S.)	L sufficient (m)
Insulite	1.4×10^7	0.0085
Rockwool	1.28×10^6	0.09
Hair felt	2.9×10^4	0.19
Cotton wool	1.6×10^4	0.79

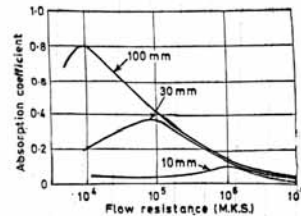


Figure 7.9. Optimum flow resistance at various thicknesses for frequency of 500 Hz.

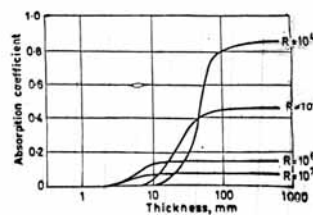


Figure 7.10. Sufficient thickness at various flow resistances for frequency of 500 Hz.

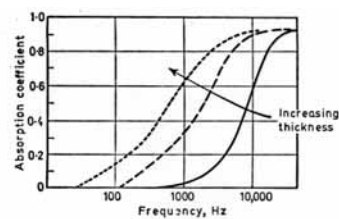
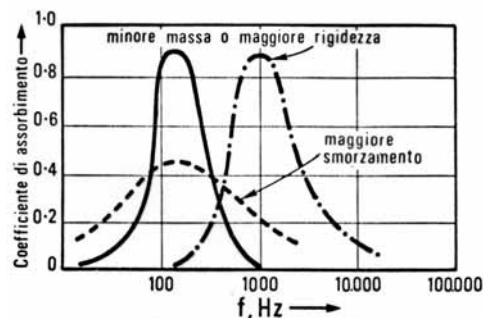
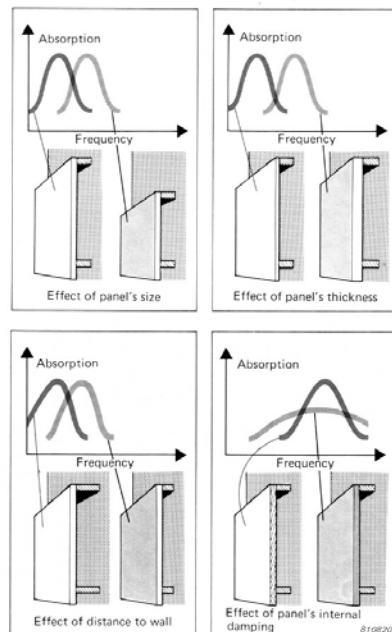


Figure 7.11. Effect of thickness on absorption coefficient of porous absorber.

Un secondo meccanismo di dissipazione è legato alla resistenza opposta alla vibrazione da un pannello flessibile. La vibrazione deve essere cioè smorzata o da attrito interno dell'elemento, o dai suoi supporti o da materiale posto posteriormente. L'assorbimento è particolarmente intenso nel campo di frequenze prossimo alla risonanza, di solito situato nel campo delle basse frequenze.



Pannelli sottili montati su di un supporto assorbono bene le basse frequenze in una banda piuttosto stretta che dipende dalla dimensione e dallo spessore del pannello e dalla sua distanza dalla parete. La banda di assorbimento efficace dipende dallo smorzamento del pannello (interno o aggiunto). Un risultato analogo richiederebbe enormi spessori negli assorbitori porosi.



Con meccanismi analoghi opera un risonatore acustico realizzato come elemento fonoassorbente. Si tratta di una cavità comunicante con l'esterno tramite un collo lungo e stretto dove l'effetto di attrito è particolarmente pronunciato. La frequenza di risonanza di un risonatore acustico di forma regolare è data da:

$$f = 5500 \frac{S}{\sqrt{vV}}$$

Dove V è il volume del risonatore, S è la sezione del collo e v il volume del collo (unità CGS).

Ad esempio vaso con $D=10$ cm, altezza 12 cm, collo con diametro 2 cm e altezza 3. La frequenza di risonanza è data da:

$$f = 5500 \frac{\frac{\pi}{4} 2^2}{\sqrt{\frac{\pi}{4} 2^2 \times 3 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2 \times 12}} = 183 \text{ Hz}$$

Lo smorzamento nella zona del collo può comportare un allargamento della zona di assorbimento. I risuonatori acustici vengono utilizzati quando si vogliono degli assorbimenti mirati.

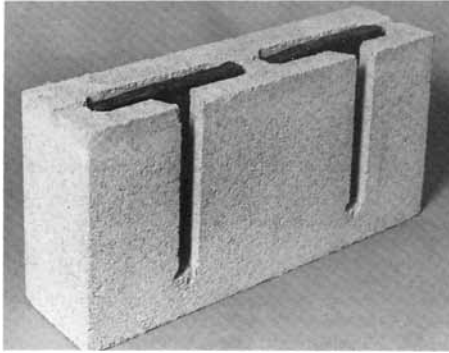
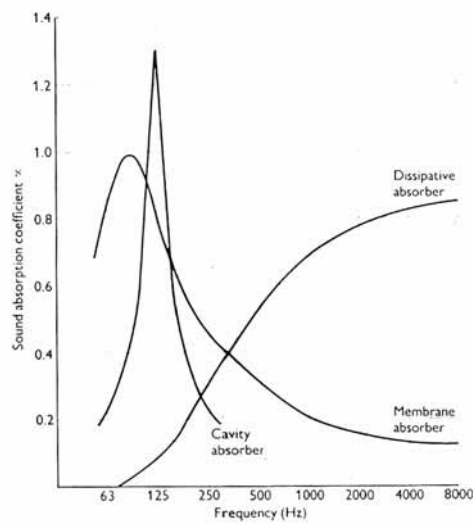


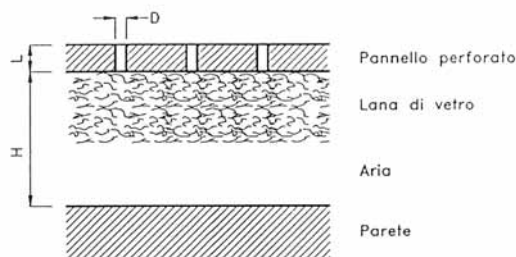
Figure 3.17b Acoustic Block Wall with Component Tuned Brick Courtesy of Edenhall

Il risultato complessivo mette in luce come per avere un buon assorbimento in tutte le frequenze sia indispensabile utilizzare nell'ambiente vari tipi di sistemi di assorbimento sonoro.

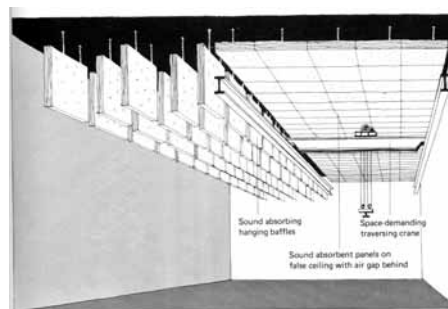


In realtà l'effetto del risonatore acustico è sfruttato in qualche modo dai pannelli forati. Un pannello rigido perforato è montato a pochi cm di distanza da una parete rigida: l'intercapedine contiene in misura più o meno grande materiale poroso.

E' come se il pannello fosse costituito da un numero di risonatori acustici pari al numero dei fori. L'inserimento di materiale poroso amplia il campo di assorbimento altrimenti selettivo. Variando le caratteristiche geometriche e costruttive dei pannelli acustici si può ottenere una varietà di prestazioni acustiche diverse.



I pannelli acustici possono costituire superficie di finitura (soffitti e pareti degli ambienti). In alternativa o in aggiunta si possono utilizzare gli assorbitori sospesi, particolarmente utili nelle strutture industriali dove le superfici perimetrali sono utilizzate da installazioni tecniche. Frequentemente questi assorbitori sospesi sono rivestiti da un film di plastica leggera che ha lo scopo di proteggere il materiale dall'erosione. Questo non impedisce l'effetto assorbente, tuttavia ne riduce la capacità alle alte frequenze tanto più quanto maggiore lo spessore protettivo.



Benché molti elementi presenti nell'ambiente siano riflettenti, ve ne sono anche con effetto fonoassorbente:

Si consideri il pavimento in legno su travetti, ovvero il soffitto in pannelli di legno.

Tabella 4-I. Coefficienti di assorbimento indicativi di alcuni elementi costruttivi, di arredo o rivestimento di ambienti civili

Materiale	Coefficiente di assorbimento alla frequenza di Hz						NRC
	125	250	500	1000	2000	4000	
<i>elementi costruttivi</i>							
Parete in muratura o in cemento con intonaco	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,00
Marmo lucidato o piastrelle	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00
Pavimento in legno (parquet su cemento)	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05
Pavimento in legno (su travetti)	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,10
Pavimento in linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Pavimento in gomma	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	0,08	0,05
Moquette	0,05	0,13	0,20	0,42	0,48	0,48	0,30
Vetrata (grosso spessore)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05
Finestra chiusa	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,15
Soffitto in cemento	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
Soffitto sospeso in gesso liscio	0,25	0,20	0,10	0,05	0,05	0,10	0,10
Soffitto in pannelli di legno	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,15

Si consideri l'effetto rilevante di tendaggi o tappeti, oltre che di elementi di tipo poroso, ovvero di pannelli acustici.

<i>elementi di rivestimento e di arredo</i>							
Tappeto pesante su cemento	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65	0,30
Tappeto pesante su gomma	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
Tendaggio leggero non drappeggiato	0,03	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30	0,15
Tendaggio pesante drappeggiato	0,50	0,50	0,70	0,90	0,90	0,90	0,75
Lana roccia, spessore 2,5 cm	0,26	0,45	0,61	0,72	0,75	0,85	0,65
Idem, spessore 5 cm	0,38	0,54	0,65	0,76	0,78	0,85	0,70
Lana di vetro ricoperta di lamierino metallico forato per il 15% dell'area	0,50	0,75	0,75	0,85	0,75	0,70	0,80

Ed ancora pannelli di vario tipo.

Materiale	Coefficiente di assorbimento alla frequenza di Hz						NRC
	125	250	500	1000	2000	4000	
Feltro soffice spessore 5 cm	0,25	0,35	0,60	0,85	0,90	0,90	0,70
Fibra di feltro e amianto	0,09	0,14	0,29	0,50	0,62	0,56	0,40
Pannello in legno compensato con intercapedine fra pannello e parete	0,40	0,25	0,15	0,10	0,10	0,05	0,15
Pannello in gesso, perforato	0,30	0,50	0,65	0,65	0,50	0,30	0,60
Pannello di fibre di legno, incollato	0,15	0,25	0,40	0,50	0,50	0,40	0,40
Pannello di fibre minerali, incollato	0,15	0,30	0,45	0,50	0,60	0,55	0,45
Idem, su listelli	0,20	0,60	0,90	0,85	0,80	0,85	0,80

Infine possono risultare importanti elementi di arredo e le stesse persone.

Rivestimento acustico spruzzato su cemento spessore cm 2,5	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,76	0,75
Superficie d'acqua (piscina)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,00
<i>Altri elementi (assorbimento in m²)</i>							
Sedia di legno o metallo	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05	
Poltrona imbottita	0,10	0,30	0,35	0,45	0,50	0,40	
Persona seduta o in piedi	0,15	0,30	0,50	0,55	0,60	0,50	

I modi normali di vibrazione

Quando una sorgente sonora emette in un ambiente di forma regolare, ad esempio un parallelepipedo di lati l_x , l_y e l_z , la propagazione dell'onda comporta la riflessione in tutte le direzioni. Per certi valori degli angoli di incidenza le onde ritornano sui loro percorsi fissandosi in modo stazionario e formando delle onde stazionarie a ciascuna delle quali corrisponde un modo normale di vibrazione dell'ambiente.

Se la frequenza del suono emesso eguaglia quello di uno dei modo normali si ha risonanza che esalta questa frequenza rispetto alle altre.

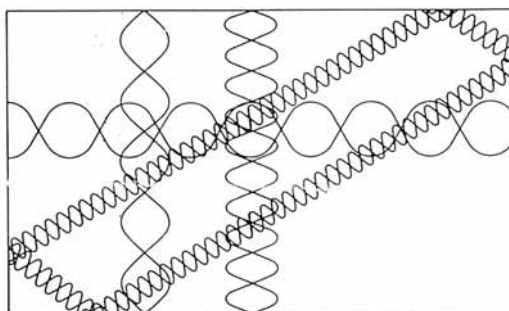


Figure 3.24 Some Room Resonant Modes

I modi normali sono dati da:

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

Con n_x , n_y e n_z numeri interi fra 0 e infinito. I modi normali sono dunque infiniti, dipendendo dalla combinazione di n_x , n_y e n_z .

Si possono raggruppare in tre classi:

- modi assiali (propagazione lungo un asse parallelo a due coppie di pareti parallele - 2 degli $n=0$);
- modi tangenziali (parallelo a una coppia di pareti - uno degli $n=0$);
- modi obliqui (tutti gli n diversi da 0).

Si indichi con A l'area complessiva delle pareti e con L la somma di tutti gli spigoli:

$$A = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z) \quad L = 4(l_x + l_y + l_z)$$

Si possono allora stimare i modi di vibrazione entro una banda di frequenza Δf :

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

I modi non sono distribuiti uniformemente rispetto alla frequenza. Ad esempio, dato un ambiente $11 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$, nella banda di frequenza larga 1 Hz vi è un solo modo di vibrazione a 125 Hz e ben 55 a 1000 Hz.

Da questo punto di vista è interessante l'esperienza di *Knudsen Harris* che hanno misurato L_p al vertice di un ambiente di dimensione $7 \times 4 \times 2,6 \text{ m}^3$ con una sorgente di rumore bianco nel vertice opposto con $Q=1$. L'esito mostra come i modi normali accrescano L_p .

Questo fenomeno può essere limitato sia evitando rapporti interi fra gli spigoli, che assumendo una forma più irregolare che aumentando l'assorbimento delle pareti (le valutazioni qui presentate sono per pareti rigide).

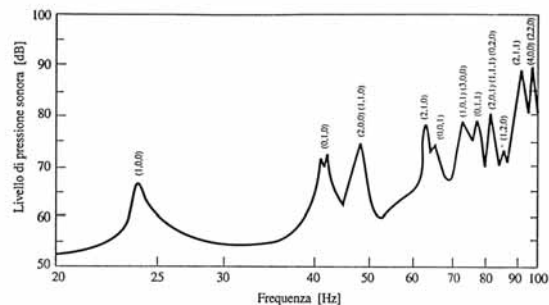
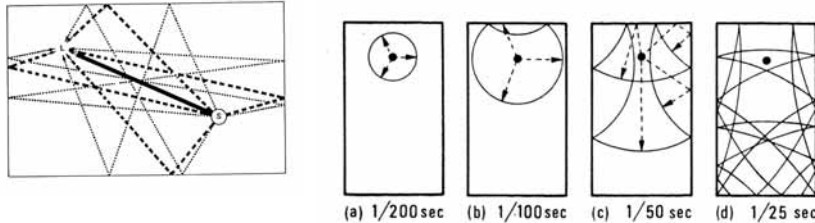


Figura 5.7 Livello di pressione sonora in un vertice di un ambiente a forma di parallelepipedo quando nel vertice opposto è in funzione una sorgente in grado di emettere nello spazio libero un suono di livello costante con la frequenza; dimensioni dell'ambiente $7 \times 4 \times 2,6 \text{ m}$. Ai picchi corrispondono i modi normali di vibrazione individuati dai numeri tra parentesi.

La riverberazione

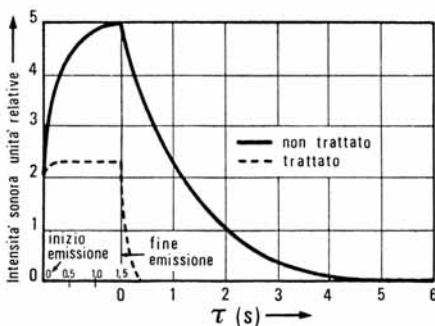
Se una sorgente sonora irradia in una stanza chiusa, poco dopo l'inizio dell'emissione sonora si hanno le prime riflessioni:



In un periodo di tempo dipendente dalle dimensioni della stanza l'intero ambiente è interessato da riflessioni multiple che incrementano il livello di energia sonora nella stanza, portandolo a valori superiori a quelli ottenibili dalla stessa sorgente in campo libero.

L'aumento dell'intensità sonora è piuttosto rapido dall'inizio dell'emissione fino alle condizioni di regime.

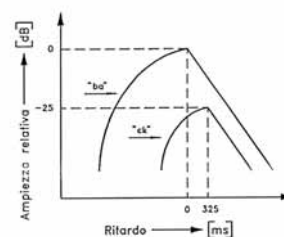
Le condizioni di regime si raggiungono quando l'energia sonora assorbita dalle pareti nell'unità di tempo eguaglia la potenza sonora emessa dalla sorgente. Il livello sonoro a regime è tanto più elevato quanto minore è l'assorbimento delle pareti.



Non aumenta solo l'intensità sonora, ma il livello sonoro al cessare dell'emissione diminuisce tanto più lentamente quanto minore è l'assorbimento delle pareti: l'energia sonora deve essere infatti completamente assorbita. E' il fenomeno della riverberazione.

I fenomeni transitori dovuti alla riverberazione caratterizzano in maniera determinante il comportamento acustico di una sala. I suoni più comuni, musica e parlato, sono costituiti da una successione di segnali di breve durata, il cui sviluppo può essere rappresentato da una successione di impulsi. Per avere un buon ascolto essi vanno distintamente percepiti. Se si considera la parola *back*, la sillaba *ck* può essere ritardata di 320 ms rispetto alla sillaba *ba* con un livello di pressione più basso di circa 25 dB. Se il transitorio di estinzione è tale che l'energia sonora non decada di almeno 25 dB in 320 ms, vi sarà un mascheramento dovuto alla coda sonora della prima sillaba con perdita di intelligibilità.

Sono dunque due gli esiti principali della diffusione sonora in un ambiente chiuso: il rinforzo rispetto al campo libero e la riverberazione.



Rinforzo rispetto al campo libero

Si consideri un ambiente di volume V e superficie delimitante S in cui ha luogo un'emissione sonora di potenza W .

Il bilancio energetico relativo all'energia sonora è il seguente:

$$Wdt = \alpha_m \frac{DV}{t_m} dt + V \frac{dD}{dt} dt$$

Il primo termine al secondo membro è l'energia assorbita nel tempo dt e il secondo termine è l'energia che deriva da un incremento di densità di energia sonora nell'ambiente. L'intervallo di tempo t_m è quello medio che intercorre fra due rinvii consecutivi dalle pareti. Questo è immediatamente collegato al libero cammino medio dell'energia sonora fra due rinvii consecutivi dalle pareti.

In un campo perfettamente diffuso si ha:

$$I = \frac{p^2}{4\rho c} \quad D = \frac{p^2}{\rho c^2}$$

La potenza sonora incidente in media sulle pareti della stanza per la presenza di un campo sonoro di intensità I è al netto della potenza W immessa che è a sua volta incidente:

$$W_{in} = IS_{tot} = \frac{p^2}{4\rho c} S_{tot} = \frac{Dc}{4} S_{tot}$$

Il tempo che deve trascorrere perché l'intera energia sonora della stanza sia interessata da una riflessione è:

$$\frac{Dc}{4} S_{tot} t_m = DV \quad \text{da cui:} \quad t_m = 4 \frac{V}{cS_{tot}}$$

E il cammino libero fra due riflessioni è proprio $4V/S$.

Valore della densità di energia sonora in regime stazionario

Si valuta la potenza sonora incidente come la somma di quella emessa e di quella derivante dalle riflessioni che sono in numero di $Sc/4V$ nell'unità di tempo:

$$W_{in} = DV \frac{Sc}{4V} + W$$

L'equazione di bilancio è la seguente:

$$Wdt = \alpha_m W_{in} dt + V \frac{dD}{dt} dt$$

La condizione di regime viene raggiunta quando:

$$\frac{dD}{dt} = 0 \quad \text{da cui:} \quad W = \alpha_m W_{in}$$

Quest'equazione di bilancio si può così scrivere: $W = \alpha_m W + \alpha_m D \frac{Sc}{4}$

Si ricava infine la densità dell'energia sonora a regime:

$$D = \frac{4W}{c} \frac{1 - \alpha_m}{\alpha_m S} = \frac{4W}{cR}$$

R viene definita costante di ambiente:
$$R = \frac{\alpha_m S}{1 - \alpha_m}$$

L'espressione dà densità nulla per $\alpha_m = 1$

In un certo punto dell'ambiente si compone il suono diffuso con il suono diretto:

$$p^2 = p_d^2 + p_r^2 \quad p_d^2 = D\rho c^2 = \frac{4W}{R} \rho c$$

Per la componente diretta, in presenza di caratteristiche direzionali si ha un'espressione del tipo:

$$I = \frac{WQ}{4\pi r^2} \quad \text{da cui:} \quad p^2 = W\rho c \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$$

In conclusione il livello della pressione sonora in campo riverberante è dato da:

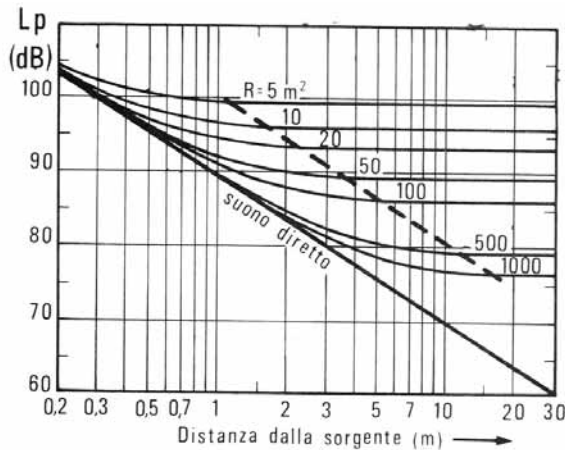
$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right]$$

Con questa espressione si può risalire al livello L_w da una misurazione di pressione sonora.

Risulta indispensabile conoscere la potenza sonora per prevedere il livello di pressione negli ambienti diversi in cui può essere collocato un macchinario rumoroso.

A piccola distanza dalla sorgente sonora è prevalente la componente diretta, mentre poi lo diventa la riflessa.

Si abbia ad esempio $R=100 \text{ m}^2$ e $W=1 \text{ mW}$. A 1m di distanza con $Q=1$ si ha per la componente diretta 79 dB e per la diffusa 76. A 10 m si ha rispettivamente 59 e 76 dB ancora. Solitamente risulta trascurabile il contributo del suono diretto ad una distanza pari a:



$$d = 0,5\sqrt{a}$$

Il tempo di riverberazione

A partire dallo studio accurato del cattivo funzionamento dell'auditorium del *Fogg Art Museum* ad *Harvard* da parte di *Wallace Clement Sabine* nel 1895 si è cominciato a ragionare in acustica architettonica di tempo di riverberazione.

Questo era stato definito da *Sabine* il tempo necessario all'estinzione del suono in un ambiente a partire dall'istante di spegnimento della sorgente.

Con precisione viene definito come il tempo necessario ad una riduzione di 60 dB rispetto al livello di regime.

Un solo tempo di riverberazione può caratterizzare un intero ambiente acustico solo nel caso in cui la propagazione del suono sia prevalentemente diffusa: l'ambiente deve essere di forma regolare,

con sorgente non troppo periferica ed assorbimento non troppo diverso fra le pareti. L'ambiente può essere allora descritto come se avesse uno stesso:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}$$

Sabine determinò empiricamente la relazione che porta il suo nome. Essa si può dimostrare nell'ipotesi di assorbimento continuo dell'energia sonora, cioè che l'assorbimento che si verifica fra due rinvii si distribuisca per ogni tempuscolo dt all'interno di t_m . La relazione vista precedentemente allo spegnimento della sorgente presenta $W=0$:

$$\alpha_m \frac{DV}{t_m} dt + V \frac{dD}{dt} dt = 0$$

Si ricava subito che:

$$\frac{dD}{D} = -\frac{cS}{4V} \alpha_m dt$$

Per $t=0$ la densità sarà pari al valore di regime D_o . A quel punto integrando l'equazione differenziale si ottiene:

$$\ln \frac{D}{D_o} = -\frac{cS}{4V} \alpha_m t \quad D = D_o \exp\left[-\frac{cS}{4V} \alpha_m t\right]$$

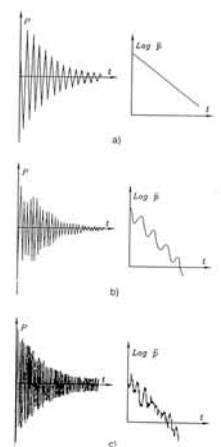
Il tempo di riverberazione è definito quello per cui la densità si riduce a un milionesimo:

$$\log \frac{D}{D_o} = -6 = \log \left[\exp\left[-\frac{ca\tau}{4V}\right] \right] = -\frac{ca\tau}{2,3 \times 4V}$$

Sostituendo dei valori numerici si ottiene infine la

$$\tau = \frac{2,3 \times 4 \times 6}{343} \frac{V}{a} = 0,16 \frac{V}{a}$$

Come dire, il tempo di riverberazione è direttamente proporzionale al volume dell'ambiente ed inversamente proporzionale al suo potere fonoassorbente.



L'assorbimento è, tuttavia, un fenomeno discontinuo e non continuo.
Data la densità di regime D_o , dopo n riflessioni questa si riduce a:

$$D(n) = D_o(1 - \alpha_m)^n$$

Si hanno $cS/4V$ riflessioni nell'unità di tempo, per cui dopo un tempo t , la densità si riduce a:

$$D(t) = D_o(1 - \alpha_m)^{\frac{cS}{4V}t} = D_o \exp\left\{-\frac{cS}{4V}t[-\ln(1 - \alpha_m)]\right\}$$

$$\ln x^t = t \ln x$$

$$x = e^{\ln x}$$

$$\log_{10} x = \ln x \times \log_{10} e$$

Ponendo la riduzione che definisce il tempo di riverberazione:

$$\log \exp \frac{cS[-\ln(1 - \alpha_m)]\tau}{4V} = 6 \quad \frac{cS[-\ln(1 - \alpha_m)]\tau}{4 \times 2,3 \times V} = 6$$

Si ottiene la formula di *Eyring*:

$$\tau = \frac{6 \times 4 \times 2,3}{343} \frac{V}{S[-\ln(1 - \alpha_m)]} = \frac{6 \times 4 \times 2,3}{343 \times 2,3} \frac{V}{S[-\log(1 - \alpha_m)]} = \frac{0,07V}{S[-\log(1 - \alpha_m)]}$$

La formula di *Eyring* ha una validità più ampia di quella di Sabine, anche in presenza di assorbimento molto intenso.

Quando l'ambiente sia di grandi dimensioni e poco assorbente, i tempi dati dalla formula sono irrealisticamente elevati. Manca infatti il contributo dell'assorbimento atmosferico. Esso procura un'ulteriore attenuazione della densità, pari a:

$$D_o e^{-mx}$$

Dove x nell'unità di tempo è pari a c .

Si ha allora:

$$D(t) = D_o(1 - \alpha_m)^{\frac{cS}{4V}t} e^{-mct}$$

$$D(t) = D_o \exp\left\{-\frac{cS}{4V}t[-\ln(1 - \alpha_m)]\right\} \times \exp(-mct)$$

Lo sviluppo in serie di: $\ln(1 - \alpha) = -\alpha - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{3}\alpha^3 - \dots$

Si arriva così all'espressione semplificata:

$$p^2(t) = p^2(0) \exp\left\{-\frac{cS\alpha_m}{4V}t - mct\right\}$$

Il tempo di riverberazione in questo caso diventa:

$$\tau = \frac{2,3 \times 4 \times 6}{c(\alpha_m S + 4mV)} = 0,16 \frac{V}{a + 4mV}$$

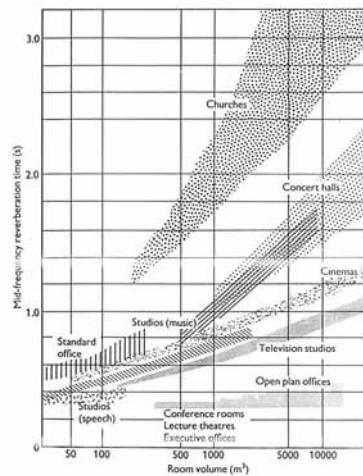
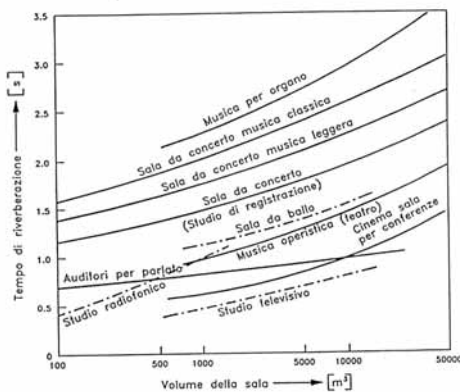
L'effetto è importante per a molto piccolo e per le alte frequenze:

f	2000	4000	8000
$4m$	0,0096	0,0244	0,086

Da un lato la riverberazione è utile per l'effetto di rinforzo. In particolare va ricordato l'effetto *Haas* per cui il risultato globale di più riflessioni viene riferito dall'orecchio al primo suono che arriva. Di fatto le riflessioni entro 0,035 s dal suono diretto non vengono avvertite come tali, ma come un rinforzo del suono.

La distanza interessata, di circa 12 m, suggerisce che potrebbe risultare coinvolto il soffitto, il cui trattamento acustico va limitato se l'ambiente non viene amplificato.

Dall'altro lato la riverberazione può peggiorare notevolmente la qualità dell'ascolto, per cui si hanno dei tempi di progetto, suggeriti in funzione del volume dell'ambiente e del tipo di destinazione:



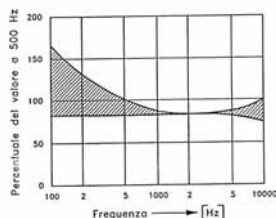
Una formula empirica proposta per la musica è:

$$\tau_{ott} = 0,1\sqrt[3]{V}$$

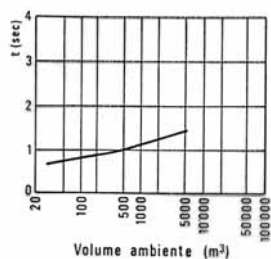
Mentre per il parlato (sempre con unità m³ e s):

$$\tau_{ott} = 0,5 + 10^{-4} V$$

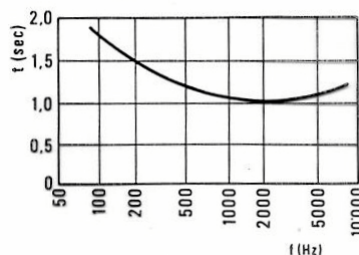
Il tempo ottimale dipende dalla frequenza. I valori sono suggeriti per 500 Hz. Un incremento del tempo alle basse e alle alte frequenze può dare un gradito effetto di rinforzo simile al *loudness*:



Indicazioni concordi vengono dati anche dal DM 18/12/75 relativo all'edilizia scolastica che fra l'altro prescrive il tempo di riverberazione per le aule secondo quest'andamento:



Viene data indicazione anche di incrementi alle basse ed alte frequenze:



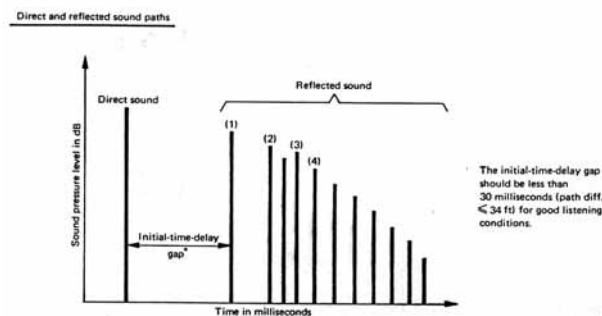
Analisi acustica di un ambiente

Dati volume V ed assorbimento totale a , una prima importante valutazione è quella di τ_0 , il tempo di riverberazione in assenza di trattamenti acustici e con una presenza di persone pari a 1/3 della capienza, 2/3 e al completo. E' buona norma eseguire una valutazione a 1/3 di riempimento, verificando che non si abbia una variazione di più di 0,5 s rispetto alla sala piena. I sedili imbottiti facilitano il raggiungimento di questo risultato.

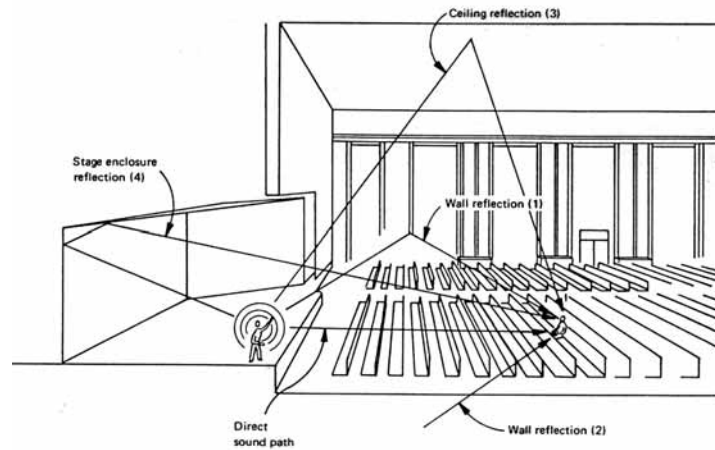
Si deve poi eseguire un controllo sul livello sonoro. L'ascoltatore più sfavorito deve ricevere un livello di almeno 45 dB. Il vincolo è molto stretto per il parlato, perché il livello L_w della voce umana è in media di 75 dB con valori più alti per le vocali e più bassi per le consonanti. L'oratore cerca di adattare la propria voce alle esigenze con un rinforzo di 6-12 dB.

Nell'insieme si ha un limite di 20-30 m di distanza per il suono diretto ed enfatizza l'importanza del rinforzo dovuto alla riverberazione.

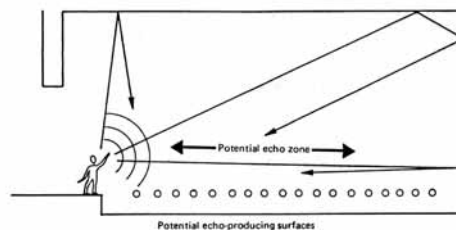
Affinché la riverberazione comporti rinforzo e non mascheramento, il ritardo non deve essere superiore a 90 ms (solo metà della potenza ricevuta dopo i 50 ms contribuisce al segnale utile). Massima efficacia si ha per ritardi <30 ms.



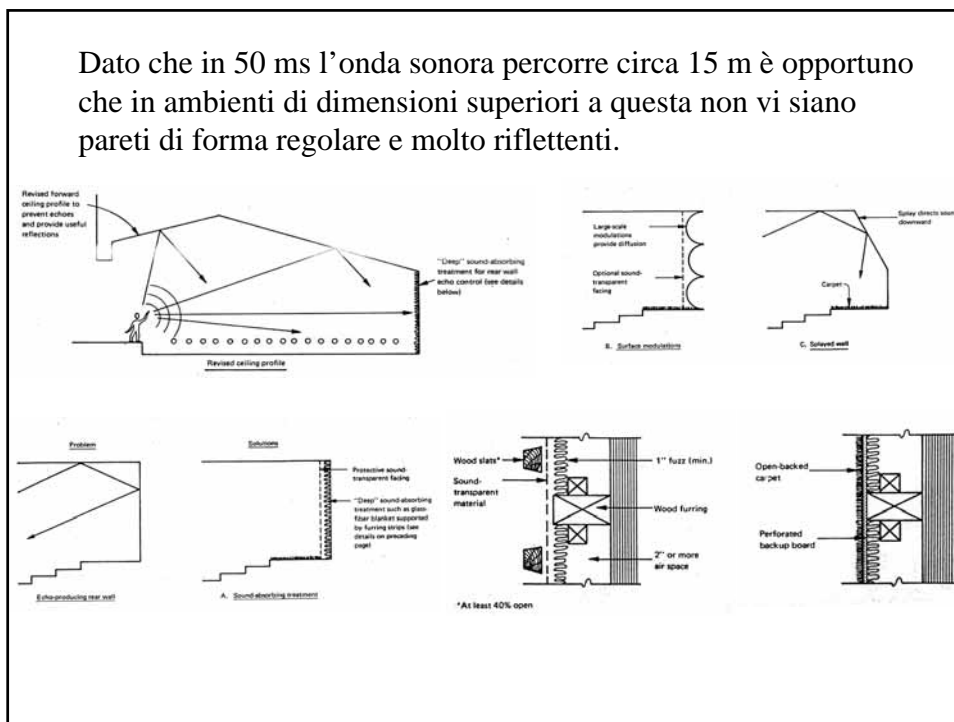
Da queste considerazioni nasce l'utilità del rinforzo dal soffitto e dalla parete posta dietro l'oratore.



Fra i difetti acustici va annoverato l'eco: si ha eco quando l'onda riflessa presenta un livello non inferiore di 15 dB del suono originario ed un ritardo superiore a 100 ms, ovvero non inferiore di 20 dB ed un ritardo superiore a 200 ms, ovvero non inferiore di 30 dB ed un ritardo superiore a 300 ms. Anche ritardi compresi fra 50 e 100 ms possono comportare eco ravvicinata comunque percepibile.



Dato che in 50 ms l'onda sonora percorre circa 15 m è opportuno che in ambienti di dimensioni superiori a questa non vi siano pareti di forma regolare e molto riflettenti.



A riflessioni di un'onda stazionaria va imputato un particolare fenomeno di eco: il **flutter**, per cui si ha la riflessione ripetuta (fluttuante) di uno stesso suono fra due pareti parallele e molto riflettenti. Un possibile rimedio è quello di aumentare l'assorbimento delle superfici a rischio, assegnando inoltre una divergenza anche leggera fra le due superfici.

Altri difetti possono essere distorsioni, ombre acustiche, focalizzazioni ed in particolare il rumore di fondo dovuto ai rumori esterni o agli impianti tecnici. Per i rumori prodotti all'interno si deve evitare che si manifestino.

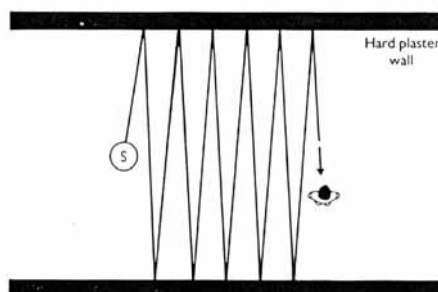


Figure 3.23 Flutter Echo

Esempio applicativo

Si esegua l'analisi acustica di una sala di conferenze della lunghezza di m 30, larghezza m 18 ed altezza m 6. La sala dispone di 600 posti con sedili di legno non imbottiti. Nella sala vi sono 150 m² di corridoio in gomma, pareti e soffitto sono intonacati.

Valutare l'ambiente e le eventuali correzioni.

Il volume è pari a $V=30 \times 18 \times 6=3.240 \text{ m}^3$

Il tempo di riverberazione consigliabile per un ambiente di queste dimensioni e per questo uso può essere il seguente:

	$f_c, \text{ Hz}$					
τ_0, s	125	250	500	1000	2000	4000
	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0

L'assorbimento totale a sala vuota è calcolabile come segue:

	$f_c, \text{ Hz}$					
	125	250	500	1000	2000	4000
- corridoio in gomma (m ² 150)	6(0,04)	6(0,04)	9(0,06)	9(0,06)	12(0,08)	12(0,08)
- pareti intonacate (m ² 576)	6(0,01)	6(0,01)	12(0,02)	12(0,02)	17(0,03)	23(0,04)
- soffitto intonacato (m ² 540)	5(0,01)	5(0,01)	11(0,02)	11(0,02)	16(0,03)	22(0,04)
- sedie (n 600)	6(0,01)	6(0,01)	12(0,02)	30(0,05)	30(0,05)	30(0,05)
Assorbimento totale in m ²	23	23	44	62	75	87

I tempi di riverberazione corrispondenti sono sicuramente inaccettabili. Ci si deve attendere inoltre tutta una serie di difetti acustici, soprattutto eco e flutter.

Si introducono sedili imbottiti; la parete di fondo viene ricoperta di tendaggi, mentre sulle pareti laterali viene disposto per 1/3 tendaggio drappeggiato e per 2/3 si applicano pannelli acustici vibranti. Gli stessi vengono posti anche sulla rimanente parete di fondo.

I corridoi restano in gomma, mentre il soffitto viene lasciato senza trattamenti per sfruttare l'effetto di rinforzo. Si hanno questi risultati:

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
poltrona imbottita (m^2)	0,10	0,30	0,35	0,45	0,50	0,40
pannelli acustici	0,40	0,25	0,15	0,10	0,10	0,05
tendaggio	0,50	0,50	0,70	0,90	0,90	0,90

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
- poltrone imbottite (n 600)	60	180	210	270	300	240
- pannelli acustici (108 + 240 = 348 m^2)	139	87	52	35	35	17
- tendaggi (108 + 120 = 228 m^2)	114	114	160	205	205	205
- soffitto (540 m^2)	5	5	11	11	16	22
- corridoio in gomma (150 m^2)	6	6	9	9	12	12
- Assorbimento totale (m^2)	324	392	442	530	568	496

Questo è l'esito del trattamento a sala vuota.

Con sala a 1/3 si devono aggiungere i seguenti valori di assorbimento dovuti alle persone, ottenuti sottraendo la quota prima attribuita alle poltrone:

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
persone (n 200)	10	0	30	20	20	20

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
assorbimento totale (m^2)	334	392	472	550	588	516
τ_0 (Sabine)	1,55	1,32	1,10	0,94	0,88	1,00
τ_0 (Eyring)	1,40	1,17	0,94	0,78	0,72	0,84

Il quadro complessivo risulta il seguente:

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Assorbimento totale a 2/3 (m ²)	344	392	502	570	608	536
τ_0 a 2/3 (Sabine)	1,51	1,32	1,03	0,91	0,85	0,97
τ_0 a 2/3 (Eyring)	1,35	1,17	0,87	0,75	0,69	0,81
Assorbimento totale a 3/3 (m ²)	354	392	532	590	628	556
τ_0 a 3/3 (Sabine)	1,46	1,32	0,97	0,91	0,83	0,93
τ_0 a 3/3 (Eyring)	1,31	1,17	0,81	0,72	0,66	0,81

I tempi ottenuti sono in linea di massima accettabili, rientrando quasi tutti nella tolleranza del 25% con valori minori di quelli consigliati e quindi adatti per l'ascolto del parlato (ma non per la musica). Date le dimensioni della sala può essere consigliabile un sistema di amplificazione, anche se un parlato forte dovrebbe ugualmente essere udibile in forma distinta.

E' interessante considerare i teatri antichi realizzati all'aperto, ad esempio il teatro greco di Epidauro (IV sec. a.C.):

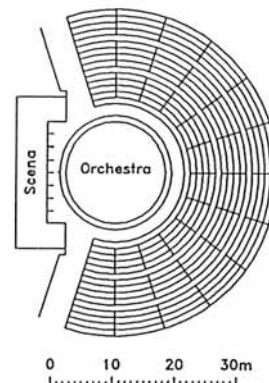
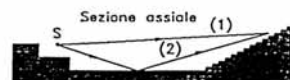
1) muro di fondo per rinforzo suono diretto e per attenuare i rumori esterni;

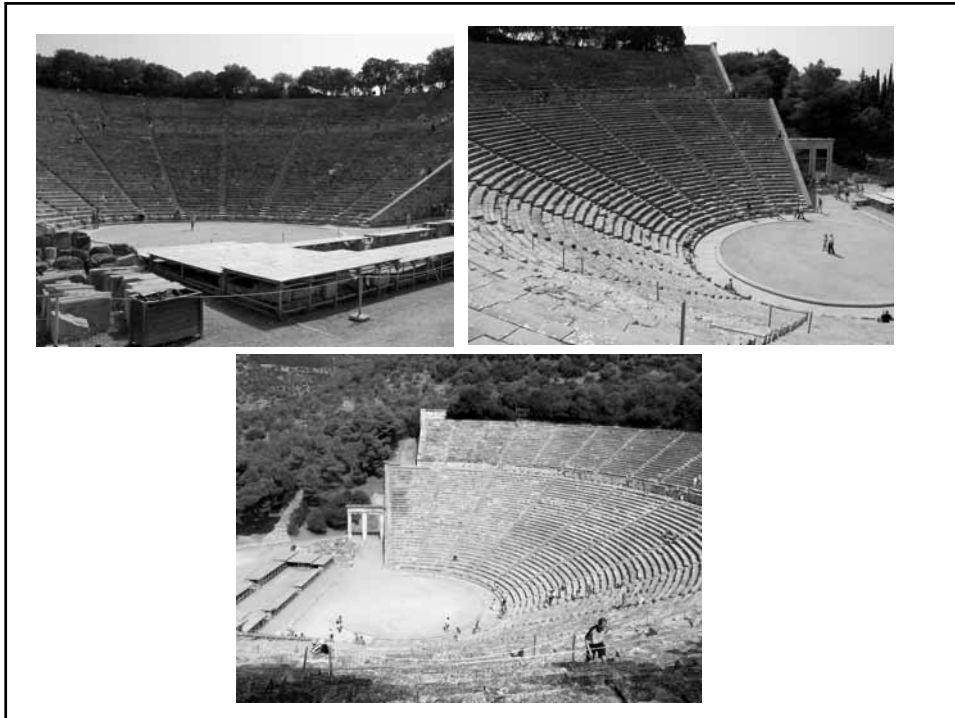
2) palcoscenico largo e poco profondo (attenuazione costante per qualsiasi posizione degli attori);

3) riflettore di grandi dimensioni (orchestra) realizzato con pavimentazione molto dura;

4) gradinate circolari con pendenze molto grandi (30°): trascurabile attenuazione radente, perché suono diretto e riflesso passano sopra le teste;

5) muro esterno (peristilio) alle gradinate: barriera al rumore.



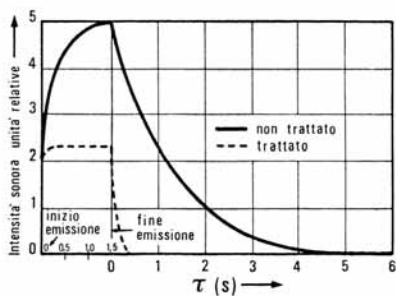


Riduzione dei rumori aerei interni

Un rumore in un ambiente chiuso può dar luogo ad un livello di pressione sonora fastidioso od intollerabile.

Date le caratteristiche dell'ambiente e della sorgente si calcola facilmente il livello del suono riflesso:

$$L_r = L_w + 10 \log \frac{4}{R} = L_w + 6,0 - 10 \log R$$



$$R = \frac{\alpha_m S}{1 - \alpha_m} \quad \alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S}$$

Considerando lo stesso ambiente con la stessa sorgente, si possono valutare due diverse costanti d'ambiente R_1 e R_2 .

Se il suono si propaga nella stanza in forma diffusa, la variazione di livello è data da:

$$D = L_{p1} - L_{p2} = 10 \log \frac{R_2}{R_1}$$

L'entità della riduzione dipende oltre che dal trattamento acustico dal livello di assorbimento iniziale, per cui si possono avere grossi benefici rispetto ad un ambiente pressoché privo di trattamento.

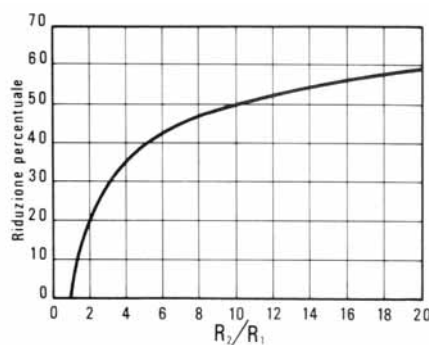
Se due ambienti di superficie diversa hanno lo stesso coefficiente di assorbimento, nell'ambiente più grande è possibile una riduzione pari a:

$$D = L_{p1} - L_{p2} = 10 \log \frac{S_2}{S_1}$$

Se in un certo ambiente si riesce a quadruplicare la costante di assorbimento, la riduzione di livello sonoro è di 6 dB e l'intensità del suono riflesso viene ridotta del 75%:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx 0,25$$

Se con un ulteriore trattamento si raddoppia la costante di assorbimento, la riduzione complessiva è di 9 dB con una diminuzione dell'intensità del suono riflesso dell'83%. Dal punto di vista soggettivo la prima riduzione è del 35%, con il secondo trattamento si arriva al 45%. I benefici vanno via via diminuendo.



Regole empiriche suggeriscono che il valore dell'assorbimento medio deve trovarsi fra 0,2 e 0,5 e che la costante di assorbimento nel trattamento acustico vada almeno triplicata per rendere tangibili i benefici.

Esempio applicativo

Si abbia un ambiente ad uso ufficio delle dimensioni 15x24x4 m³. Pavimento di legno, pareti e soffitto intonacati con 10 scrivanie e 20 sedie.

	f_c, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
-pavimento in legno (m ² 375)	15(0,04)	15(0,04)	26(0,07)	22(0,06)	22(0,06)	26(0,07)
-pareti intonacate (m ² 320)	3(0,01)	3(0,01)	6(0,02)	6(0,02)	10(0,03)	13(0,04)
-soffitto (m ² 375)	4(0,01)	4(0,01)	8(0,02)	8(0,02)	11(0,03)	15(0,04)
-sedie + scrivanie (n. 20 + 10)	-0(0,01)	-0(0,01)	-0(0,02)	-0(0,03)	2(0,05)	2(0,05)
Assorbimento totale (m ²)	22	22	40	36	45	56
τ_0 (secondi) (**)	10,9	10,9	6,0	6,7	5,3	4,3

	f_c, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$	0,02	0,02	0,04	0,03	0,04	0,05
$R(\text{m}^2)$	22	22	45	33	45	56

(**) I tempi di riverberazione così calcolati sono irrealisticamente elevati, dato che non si è tenuto conto dell'assorbimento dell'aria. Sono utili, tuttavia, per avere delle prime indicazioni.

Si esegua un trattamento con pannelli acustici sul soffitto e tappeti per 1/3 del pavimento:

	f_c, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
- soffitto (m ² 375)	187(0,50)	281(0,75)	281(0,75)	319(0,85)	281(0,75)	262(0,70)
- tappeti (m ² 125)	10(0,08)	30(0,24)	71(0,57)	86(0,69)	89(0,71)	91(0,73)
- pavimento (m ² 250)	10(0,04)	10(0,04)	17(0,07)	15(0,06)	15(0,06)	17(0,07)
- pareti (m ² 320)	3(0,01)	3(0,01)	6(0,02)	6(0,02)	10(0,03)	13(0,04)
- sedie e scrivanie	-	-	-	-	2	2
Assorbimento totale (m ²)	210	324	375	426	397	385
α	0,20	0,30	0,35	0,40	0,37	0,36
$R(\text{m}^2)$	267	459	576	713	628	602

L'analisi dei risultati può partire da uno spettro presunto di rumore interno che può essere il seguente che dà luogo a 60,5 dB(A) ed NC 54:

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
L_p , dB	61	59	57	55	53	51

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
L_{p1} , dB	61	59	57	55	53	51
$10 \log R_2/R_1$	10,8	13,2	11,1	13,3	11,4	10,3
L_{p2} , dB	50,2	45,8	45,9	41,7	41,6	40,7

Avendo aumentato il coefficiente di assorbimento di circa 20 volte, il risultato è apprezzabile dal momento che si passa a 49 dB(A) e a NC 43.

Si può pensare ad un ulteriore trattamento, ad esempio disponendo tappeti o moquette su tutto il pavimento:

	f_c , Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$	0,21	0,35	0,47	0,54	0,52	0,52
R_3 (m ²)	284	576	949	1256	1159	1159
L_{p2} , dB	50,2	45,8	45,9	41,7	41,6	40,7
$10 \log R_3/R_2$	0,3	1,0	2,2	2,5	2,7	2,8
L_{p3} , dB	49,9	44,8	43,7	39,2	38,9	37,9

Si scende a 46,5 dB(A): per la forte riduzione alle alte frequenze il risultato in termini di curve criterio è più tangibile, arrivando a NC 38. Non bisogna dimenticare la presenza del suono diretto. Per distanze dalla sorgente inferiori a $0,5\sqrt{a}$ l'aumento di assorbimento non dà

benefici. Le possibili soluzioni sono quella di spostare l'operatore o di ridurre la potenza sonora della sorgente.

Esempio applicativo

Si abbia un ambiente delle dimensioni $10 \times 15 \times 3 \text{ m}^3$ con 4 sorgenti di rumore da 4 mW ciascuna. L'ambiente presenti pavimento di cemento per metà coperto di tappeti con $NRC=0,30$ e pareti e soffitto intonacati con $NRC=0$. Un operatore si trova a distanza di 1, 6, 8, 10 m dalle 4 sorgenti che presentano (per semplicità) $Q=1$.

L'assorbimento totale è pari a solo $22,5 \text{ m}^2$ per cui $\alpha=0,05$ e $R=23,7 \text{ m}^2$. Il livello di potenza di ogni sorgente è pari a $L_W=96 \text{ dB}$ con un valore totale di 102 dB di livello della potenza sonora.

Questo dà luogo ad un livello della pressione del suono diffuso di:

$$L_{p,d} = 102 + 10 \log \frac{4}{23,7} = 94,3 \text{ dB}$$

In confronto il suono diretto fornisce un contributo trascurabile:

sorgente	$r, \text{ m}$	$10 \log (1/4 \pi r^2)$	$L_{p,r} \text{ dB}$
1	1	- 11,0	85,0
2	6	- 26,6	69,4
3	8	- 29,1	66,9
4	10	- 31,0	65,0
			85,2 dB

La composizione dà infatti 94,8 dB.

Con un trattamento del soffitto (pannelli di fibre minerali con $NRC=0,45$) e del pavimento (moquette con $NRC=0,30$) si arriva ad un assorbimento totale di $112,5 \text{ m}^2$ con $\alpha=0,25$ ed $R=150 \text{ m}^2$ per cui il suono riflesso è ora di:

$$L_{p,d} = 102 + 10 \log \frac{4}{150} = 86,3 \text{ dB}$$

Il livello complessivo è ora di 88,8 dB e solo triplicando ulteriormente la R si otterrebbe il risultato raggiunto distanziando l'operatore di un paio di m dalla sorgente più vicina.

Nel caso di uffici di tipo *open space* non solo è importante effettuare un trattamento acustico di fonoassorbimento interno agli ambienti, ma è opportuno schermare i posti di lavoro l'uno dall'altro per limitare il suono diretto. L'operazione va accoppiata con un trattamento acustico robusto del soffitto per evitare il disturbo da suoni riflessi:

