

Portale dedicato all'informazione e alla conoscenza
delle problematiche legate al mondo dell'Acustica

www.inquinamentoacustico.it



Manuale tecnico-pratico

ASSORBIMENTO ACUSTICO

**Metodi di miglioramento delle
prestazioni acustiche degli
edifici**



A cura di

Luciano Mattevi

Specialista in acustica

Indice

La propagazione sonora in ambienti chiusi.....	4
<i>Assorbimento acustico</i>	<i>5</i>
Assorbimento per porosità	6
Assorbimento per risonanza di cavità	7
Assorbimento per risonanza di pannello	9
<i>Livello di pressione sonora in un ambiente chiuso.....</i>	<i>10</i>
<i>Tempo di riverberazione</i>	<i>11</i>
Il comfort acustico.....	13
<i>Una buona ricezione</i>	<i>13</i>
Criteri di progettazione acustica	16
Abitazioni.....	17
Scuole.....	17
Ospedali, case di cura e di riposo.....	18
Sale riunioni e biblioteche.....	18
Materiali e indicazione di posa	19
<i>Controsoffitti fonoassorbenti</i>	<i>19</i>
Appendice	22
<i>Coefficienti di assorbimento acustico di alcuni materiali</i>	<i>22</i>
Bibliografia	23

PREMESSA

In questo lavoro ho voluto fornire una panoramica degli elementi di acustica architettonica, ossia di quella branca dell'acustica che studia la propagazione del suono all'interno di ambienti chiusi, allo scopo di far apprendere alcuni concetti base circa le caratteristiche di fonoassorbimento dei materiali a supporto della progettazione, affinché il tecnico incaricato possa affrontare consapevolmente l'esigenza di una clientela sempre più attenta e sensibile a questo tipo di problematica.

Per creare un ambiente acusticamente confortevole, infatti, non basta considerare solamente il grado di isolamento acustico tra le diverse unità abitative ma è necessario che all'interno di un ambiente di lavoro, di studio, di svago o abitativo siano garantiti adeguati requisiti, quali rumore di fondo contenuti e tempi di riverbero adeguati. A tal fine, la progettazione e la costruzione degli edifici devono tenere in debita considerazione le caratteristiche fonoassorbenti delle diverse partizioni (pareti, solai, pavimenti e infissi) allo scopo di assicurare un adeguato comfort acustico.

Luciano Mattevi

La propagazione sonora in ambienti chiusi

Sempre più spesso i nuovi canoni di vita ci portano a trascorrere gran parte del tempo all'interno di ambienti chiusi (casa, ufficio, cinema, teatro, ecc.). Contemporaneamente, è cresciuta l'esigenza di progettare ambienti acusticamente adeguati in relazione alla loro destinazione d'uso.

Di certo sarà capitato a tutti di sperimentare la sensazione uditiva all'interno di una grande sala di teatro, la quale è assai diversa da quella percepita all'interno della propria stanza da letto. Ciò deriva dal fatto che la perturbazione dell'aria e, quindi, dell'onda sonora interagisce con i confini dello spazio confinato in cui ci troviamo. Grazie a ciò è possibile, ad esempio, poter valutare, ad occhi chiusi, se il volume dell'ambiente è grande oppure piccolo.

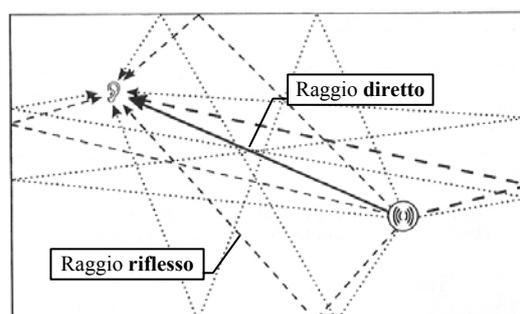
Gli aspetti fisici che regolano la propagazione del suono all'interno degli ambienti chiusi è tanto complessa che non è possibile descrivere il fenomeno con mezzi matematici analitici. Tuttavia, sono disponibili modelli di calcolo che, per mezzo di ipotesi semplificative, permettono di ottenere previsioni sufficientemente attendibili.

L'impiego di tali modelli è destinato alla soluzione di problematiche complesse legate ai grandi spazi, quali auditori, teatri, palazzetti, ecc. per i quali è necessario valutare in modo puntuale i diversi accorgimenti progettuali allo scopo di garantire una diffusione sonora ottimale. Nella valutazione degli ambienti di uso comune (casa, ufficio, mense e altro) è possibile impiegare, invece, algoritmi di calcolo semplificati, comunque utili a garantire un adeguato risultato.

Al tal fine, è necessario conoscere i meccanismi di propagazione del suono in uno spazio confinato, le cui dimensioni siano sufficientemente grandi. Approssimativamente, si definisce un ambiente di dimensioni grandi quell'ambiente la cui dimensione media è dieci volte più grande della lunghezza d'onda. Se si considera che le frequenze percepite da un orecchio normoudente sono comprese fra 20 Hz e 20 kHz, ossia entro una lunghezza d'onda compresa fra 17 metri e 1,7 cm circa, è chiaro che non è possibile a priori stabilire in quale condizione si è posti. Ad esempio, in una camera di abitazione in cui è collocato un impianto home-theatre, l'ambiente sarà da considerare piccolo nel caso di suoni emessi dall'altoparlante dei bassi (woofer), mentre sarà da considerare grande per quelli emessi dall'altoparlante degli acuti (tweeter).

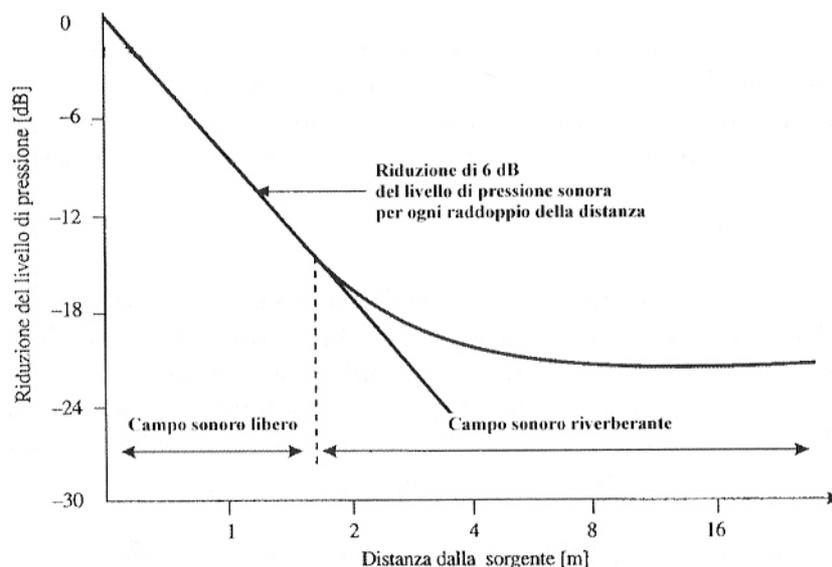
Ciò considerato, in un ambiente confinato, una sorgente sonora determina due campi sonori sovrapposti:

- un *campo sonoro diretto*, prodotto dal suono che si trasmette direttamente dalla sorgente al ricettore;
- un *campo sonoro riverberante*, prodotto dalle riflessioni delle onde sonore sulle superfici che delimitano l'ambiente. L'onda sonora riflessa raggiungerà il ricettore dopo l'onda diretta, il cui ritardo dipende dalla lunghezza del percorso che ha compiuto a causa delle riflessioni.



Il *campo sonoro diretto* dipende principalmente dalla distanza che intercorre fra sorgente e ricettore, il cui decadimento è legato alla relazione prevista per la propagazione del suono all'aperto (campo libero), mentre il *campo sonoro riverberante* dipende dalla geometria e dalle caratteristiche di assorbimento del rumore delle superfici che delimitano l'ambiente.

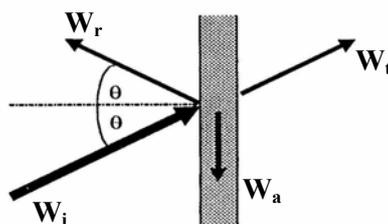
Nella figura a seguire è riportato un esempio della riduzione sonora risultante dalla sovrapposizione dei due campi (diretto e riverberante) in funzione della distanza.



Il decadimento sonoro in prossimità della sorgente è controllato esclusivamente dal suono diretto, mentre a distanze superiori prevale il suono riflesso.

Assorbimento acustico

Le proprietà assorbenti dei materiali sono quantificate attraverso il *coefficiente di assorbimento acustico* α , il quale è definito come rapporto tra la potenza sonora assorbita e la potenza sonora incidente. Il valore di α rappresenta quindi la frazione di energia sonora assorbita da un determinato materiale e può variare fra 0, nel caso in cui tutta l'energia incidente è riflessa, e 1, nel caso in cui tutta l'energia incidente è assorbita. Pertanto, se il valore di α è pari a 0,7 significa che il 70% dell'energia incidente sulla superficie del materiale è assorbita.



Ripartizione della potenza sonora incidente su una partizione

Tuttavia, per un medesimo materiale il valore di α varia al variare delle frequenze e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica, quindi i coefficienti di assorbimento acustico (sia teorici come α , sia determinati sperimentalmente come α_{sabin}) sono espressi in funzione della frequenza in banda d'ottava o 1/3 d'ottava.

Nelle schede tecniche fornite dal produttore, compare spesso il coefficiente di riduzione del rumore NRC (Noise Reduction Coefficient), il quale è calcolato mediando i valori di α_{sabin} alle frequenze di 250, 500, 1000 e 2000 Hz. In alternativa, è utilizzato il coefficiente di assorbimento acustico ponderato α_w ottenuto mediante confronto con una curva di riferimento secondo il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 11654.

L'impiego di tali descrittori semplificati, seppur utili per un rapido confronto dei diversi materiali, non fornisce un adeguato supporto per la progettazione delle qualità acustiche di un ambiente confinato.

La misura in laboratorio dei valori dei coefficienti di assorbimento acustico avviene, di norma, con due metodi:

- *metodo delle onde stazionarie* in tubo, per incidenza normale del suono, per campioni di piccole dimensioni;
- *metodo per incidenza casuale*, eseguito in camera riverberante per campioni di grandi dimensioni (almeno 10 m² di superficie) secondo la ISO 354.

Il metodo per incidenza casuale è quello che meglio approssima i casi reali, poiché le onde sonore incidono sulla superficie della partizione (pavimento, solaio, pareti) secondo diversi angoli.

L'assorbimento acustico di un materiale avviene grazie alla conversione in calore di parte dell'energia incidente sul medesimo, anche se, nella realtà, tale meccanismo è certamente più complesso.

I principi attraverso cui un sistema assorbe energia sonora sono diversi e vengono generalmente suddivisi in tre classi:

- *assorbimento per porosità*;
- *assorbimento per risonanza di cavità*;
- *assorbimento per risonanza di pannello*.

Assorbimento per porosità

La superficie di un elemento è tanto più assorbente quanto maggiore è la sua capacità di trasformare l'energia sonora incidente in calore per attrito nelle microcavità del materiale. I migliori materiali acustici sono, infatti, quelli porosi e fibrosi di cui esistono vari tipi, quali: lane di vetro e di roccia, schiume di poliuretano espanso a celle aperte, fibre di legno, feltri, ecc..

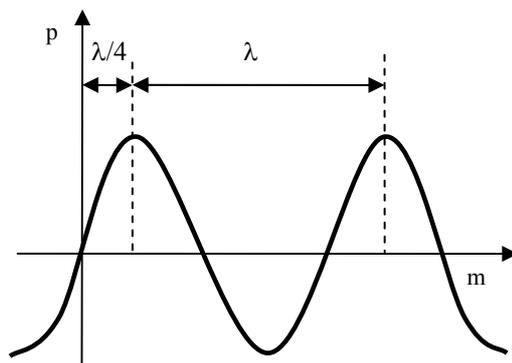
Il coefficiente di assorbimento di tali materiali dipende da:

- *porosità*;
- *spessore*;
- *densità*;
- *frequenza del suono incidente*;

– *forma*.

La *porosità* è definita come rapporto tra il volume occupato dai pori e il volume totale. L'assorbimento acustico cresce all'aumentare della porosità. I materiali che assorbono il suono con maggiore efficacia hanno una porosità molto elevata, anche oltre il 90%.

Lo *spessore* del materiale condiziona l'entità dell'energia sottratta all'onda incidente. In prossimità di una parete rigida, il primo punto corrispondente al massimo della velocità di pressione delle particelle si trova ad una distanza $d=\lambda/4$ dalla parete, distanza corrispondente alla massima ampiezza della lunghezza d'onda da trattare. Da ciò consegue che α è crescente all'aumentare dello spessore per le basse frequenze, mentre cresce in misura poco significativa per quelle alte.



Un sistema normalmente impiegato per migliorare l'efficienza del materiale alle frequenze medio-basse, evitando di impiegare materiali con spessori elevati, è quello di interporre un'intercapedine d'aria tra la superficie da trattare e il pannello assorbente, il quale dovrà essere posto ad una distanza dalla superficie (parete o soffitto) corrispondente al massimo dell'ampiezza dell'onda sonora, ossia a $\lambda/4$.

Un altro sistema per migliorare l'efficienza del materiale alle medio-basse frequenze è quello di utilizzare materiali porosi con maggiore *densità*, quale ad esempio il poliuretano espanso (massa 30 kg/m^3 ca.) o lane minerali con densità fino a 100 kg/m^3 .



Infine, è importante la *forma* del materiale, in quanto può offrire una più estesa superficie di contatto con l'onda incidente, favorendo la dissipazione di una maggiore quantità di energia sonora. La soluzione più diffusa è quella in cui un lato del materiale è ricoperto da protuberanze a forma piramidale (come da figura).

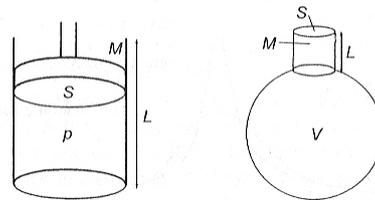
Nella scelta del materiale da impiegare risulta, quindi, di primaria importanza individuare la *frequenza del suono incidente*, caratteristica della sorgente sonora. La scelta da adottare sarà, pertanto, diversa a seconda che si intenda migliorare le qualità acustiche di una sala musica, una sala riunioni, una mensa o un capannone industriale.

Assorbimento per risonanza di cavità

Le strutture di risonanza sono costituite da pannelli di materiale non poroso (ad es. una lastra di gesso) sui quali vengono praticati dei fori di opportune dimensioni e vengono montati ad una certa distanza dalla superficie da trattare. Un siffatto sistema produce un effetto di fonoassorbimento

fondato sul principio di Helmholtz. La massa d'aria contenuta nei fori del pannello costituisce con il volume d'aria dell'intercapedine retrostante un sistema meccanico del tipo massa-molla, dotato quindi di una propria frequenza di risonanza, in corrispondenza della quale il sistema è in grado di assorbire una considerevole parte di energia.

L'assorbimento di un risonatore di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi fra 50 e 400 Hz. Se l'interno del risonatore è rivestito con materiale assorbente poroso il valore del coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace.

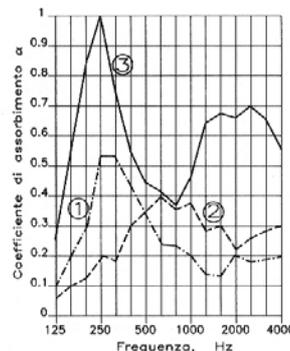


Schema sistemi acustici vibranti (risonatore di Helmholtz)

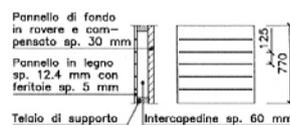
La frequenza di risonanza di pannelli di questo tipo è approssimativamente data dalla seguente relazione:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{dt}} \quad (\text{Hz})$$

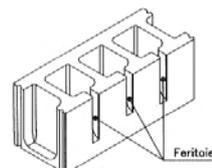
in cui P è la percentuale di foratura, ossia area forata/area del pannello, c la velocità di propagazione del suono (344 m/s a 20°C), d la distanza dalla parete, cioè lo spessore complessivo dell'eventuale materiale poroso e dell'intercapedine, t lo spessore del pannello, corrispondente alla lunghezza del collo dei risonatori.



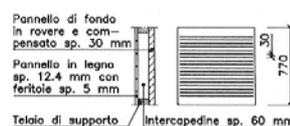
① Pannelli in legno (Risonatore a 250 Hz)



③ Elementi in calcestruzzo alleggerito dotati di feritoie (Risonatore a 250 e 2000 Hz). Dimensioni blocco: 500x200x200 mm.



② Pannelli in legno (Risonatore a 600 Hz)



Coefficienti di assorbimento acustico di alcuni pannelli risonatori

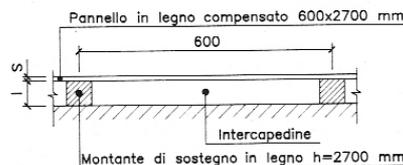
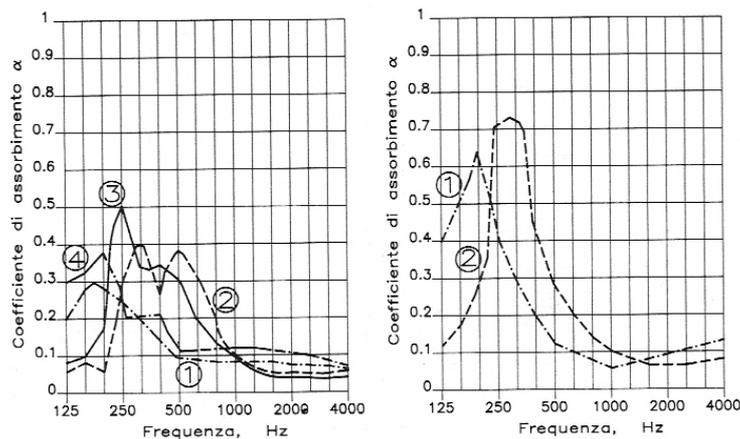
Assorbimento per risonanza di pannello

Nel caso dei pannelli flessibili (legno, gesso, ecc.), l'assorbimento acustico è in funzione della loro elasticità, in quanto le onde sonore incidenti creano una serie di pressioni e depressioni che provocano un'inflexione del pannello verso la parete mettendolo pertanto in vibrazione. In particolare, il comportamento di un sistema costituito da un pannello sottile collocato di fronte ad una parete rigida, ad una distanza non troppo elevata, può essere analizzato con lo stesso metodo utilizzato per il risonatore di Helmholtz, ossia il pannello si comporta come una massa vibrante, mentre l'aria contenuta nella cavità come una molla acustica caratterizzata dalla sua rigidità. In tal caso, la frequenza di risonanza è data da:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad (\text{Hz})$$

dove m (kg/m^2) è la massa per unità di area del pannello, e d la distanza dalla parete (metri).

Anche questo sistema è molto selettivo ed è utile per assorbire suoni incidenti caratterizzati da basse frequenze (200÷300 Hz), dove i materiali fonoassorbenti sono poco efficaci e i risonatori di Helmholtz assumerebbero dimensioni troppo grandi.



- ① Pannello come in figura,
S= 3,2 mm
l= 32 mm
- ② Pannello come in figura,
S= 1,6 mm
l= 32 mm
- ③ Pannello come in figura,
S= 3,2 mm
l= 57 mm
- ④ Pannello come in figura
S= 1,6 mm
l= 57 mm

- ① Pannello come in figura, con intercapedine
riempita di lana minerale
S= 3,2 mm
l= 32 mm
- ② Pannello come in figura, con intercapedine
riempita di lana minerale
S= 1,6 mm
l= 32 mm

Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico di alcuni pannelli vibranti

Livello di pressione sonora in un ambiente chiuso

Il calcolo del livello di pressione sonora in un ambiente chiuso è basato sul principio che il campo sonoro prodotto da una determinata sorgente, in un punto di ricezione nell'ambiente, è costituito dalla somma della quota dell'onda diretta e di quella riflessa. L'onda diretta si comporta genericamente in maniera analoga alla propagazione sonora in campo libero, ossia decade per semplice divergenza geometrica, con una riduzione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza; mentre, nel campo riverberante, è necessario calcolare l'espressione della densità dell'energia nel campo riverberante. Infatti, la potenza emessa dalla sorgente ha una prima interazione con le superfici dell'ambiente che la rinviano parzialmente all'interno. La quota di energia rinviata è dipendente dal *coefficiente di assorbimento medio* (α_m) il quale può essere calcolato con la seguente:

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

dove α_i è il coefficiente di assorbimento della i -esima superficie di estensione S_i .

Attraverso il coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente si ricava la *costante dell'ambiente* (R), definita dalla relazione:

$$R = \frac{S\alpha_m}{1 - \alpha_m} \quad (\text{m}^2)$$

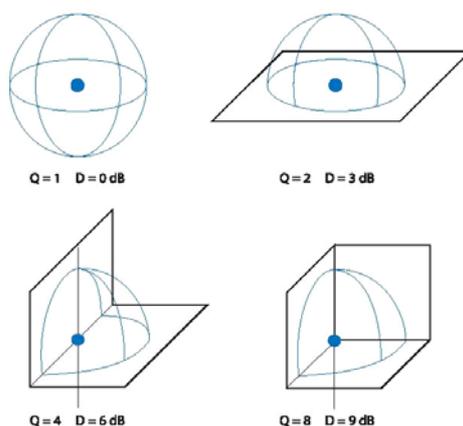
dove S è la superficie totale dell'ambiente in m^2 .

Per mezzo dell'espressione di Hopkins e Stryker è possibile determinare il livello della pressione sonora in un punto dell'ambiente avendo noto il livello della potenza sonora della sorgente (L_w).

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

dove Q è il fattore di direttività della sorgente lungo la direzione considerata e r in metri è la distanza tra il centro acustico della sorgente e il punto di ricezione.

Di seguito sono riportati alcuni valori tipici che può assumere il fattore di direttività in funzione della posizione della sorgente sonora.



<i>Tipo di emissione</i>	<i>Q</i>	<i>Indice di direttività</i>
Sferica	1	0 dB
Emisferica	2	3 dB
Tra due superfici ortogonali	4	6 dB
Tra tre superfici ortogonali	8	9 dB

Esiste tuttavia un punto in cui la densità dell'energia del campo diretto uguaglia quella del campo riverberante. Tale punto è posto ad una determinata distanza dalla sorgente, denominata distanza critica (r_{crit}), la quale è calcolata secondo la seguente:

$$r_{crit} = \left(\frac{RQ}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m})$$

Determinare il valore della distanza critica è utile per verificare se, in un determinato punto, prevale il contributo del campo diretto o quello del campo riverberante. Infatti, se il ricettore è posto ad una distanza inferiore alla distanza critica, un intervento di fonoassorbimento non produrrà alcun effetto sulla riduzione del rumore prodotto dalla sorgente; diversamente, se il ricettore è posto ad una distanza superiore alla distanza critica, è possibile stabilire a priori la riduzione del livello di pressione sonora attraverso la seguente relazione:

$$\Delta L = 10 \log (R_{dopo}/R_{prima}) \quad (\text{dB})$$

Tempo di riverberazione

Gli elementi presenti all'interno di un ambiente chiuso (pareti, arredamenti, persone, ecc.) condizionano la propagazione acustica, poiché assorbono in diversa misura l'energia sonora che incide su di loro. Tali fenomeni possono alterare e deteriorare la qualità del suono percepito dal ricettore, causando ad esempio il degrado della comunicazione verbale o dell'ascolto della musica.

Per definire la qualità acustica di un locale è stato introdotto il *tempo di riverberazione*, il quale indica il tempo, in secondi, necessario affinché, in un punto di un ambiente chiuso, il livello sonoro si riduca di una certa entità rispetto a quello che si ha nell'istante in cui la sorgente sonora ha finito di emettere.

Di norma, viene utilizzato il tempo di riverberazione T_{60} , cioè l'intervallo di tempo in cui l'energia sonora decresce di 60 dB dopo lo spegnimento della sorgente.

In un ambiente avente dimensioni abbastanza prossime fra loro il valore di T_{60} è calcolabile secondo la formula di Sabine.

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \quad (\text{s})$$

dove V è il volume dell'ambiente in m^3 e A è l'area equivalente di assorbimento totale in m^2 .

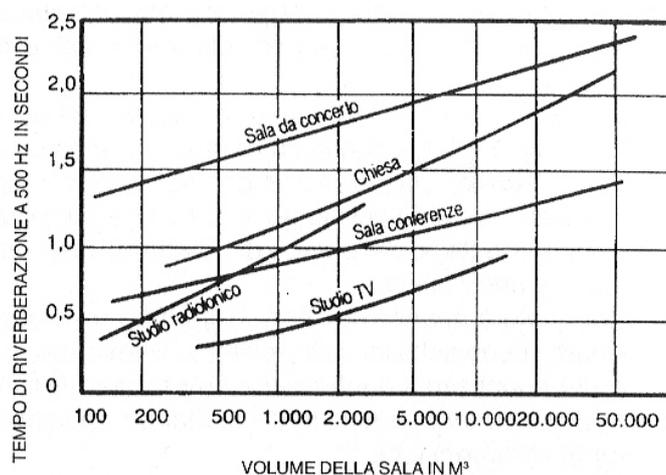
Il valore di A è ricavato con la seguente relazione:

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (\text{m}^2)$$

dove α_i è il coefficiente di assorbimento i -esimo e S_i è la superficie i -esima degli elementi presenti nell'ambiente.

La determinazione del tempo di riverberazione di un ambiente è pertanto fondamentale per poter giudicare le sue caratteristiche acustiche e decidere se intervenire sulle strutture che la delimitano aumentandone le capacità di fonoassorbimento. Si dovrà intervenire, infatti, se il valore del tempo di riverberazione T_{60} non sia almeno pari al valore ottimale, ricavato sulla scorta di tabelle o diagrammi forniti in letteratura o da norme di settore. Ad esempio per quanto riguarda gli ambienti scolastici la normativa di riferimento fa capo al D.M. 18 settembre 1975 recante "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nelle opere di edilizia scolastica", il quale indica i valori ottimali del tempo di riverberazione sia in funzione del volume dell'aula, sia in funzione delle frequenze.

A titolo esemplificativo, di seguito è riportato il diagramma con i valori ottimali dei tempi di riverberazione in funzione del volume della sala e della destinazione d'uso.



Andamento del tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume dell'ambiente e della destinazione d'uso

La presenza di persone all'interno dell'ambiente influenza il valore del tempo di riverberazione, poiché determina un aumento dell'assorbimento acustico. È questo il caso dei cinema, auditori e teatri, ossia luoghi in cui l'affluenza di persone è numerosa.

In questi casi, la situazione ottimale dovrà essere verificata con una capienza del locale pari a 3/4 di quella totale. Mentre, se l'ambiente è esistente, si potrà eseguire la verifica sperimentale con la sala vuota o, quantomeno, con la presenza di poche persone.

Il calcolo dell'assorbimento acustico, in questo caso, può essere compiuto attribuendo ad ogni persona un'area di assorbimento equivalente (A), pari a:

Valori di assorbimento per persona					
Frequenza (Hz)					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
Area di assorbimento equivalente (m ²)					
2,5	2,5	2,9	5,0	5,2	5,0

Nel caso, invece, l'intera superficie sia totalmente occupata dal pubblico il coefficiente di assorbimento acustico è il seguente:

Superficie totalmente occupata dal pubblico					
Frequenza (Hz)					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
Coefficiente di assorbimento acustico (α)					
0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87

Il comfort acustico

Per confort acustico si intende quella condizione psicofisica di benessere nella quale si trova un individuo immerso in un campo sonoro, in relazione all'attività che sta svolgendo.

L'elemento da valutare è quindi molto soggettivo, legato ad esigenze personali o a particolari sensibilità individuali, delle quali sarà necessario tener conto all'atto della progettazione di un edificio o, caso assai più frequente, nel corso di interventi di miglioria acustica.

Ciò nonostante, è possibile determinare la qualità acustica di un ambiente attraverso alcuni indici che, riferiti a diverse condizioni d'ascolto, consentono di valutare differenti aspetti della percezione sonora, ai quali corrispondono ben individuabili giudizi soggettivi.

Relativamente alla qualità acustica degli ambienti destinati all'ascolto della parola, è necessario garantire l'*assenza di disturbo* e la *buona ricezione*. Il raggiungimento di tali requisiti porta al conseguimento di condizioni ottimali di *intelligibilità della parola*, definita come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore.

Garantire l'assenza di disturbo significa ridurre qualsiasi rumore di fondo che mascheri il suono prodotto dal parlatore (rumore prodotto da apparecchiature interne all'edificio o rumori provenienti dall'esterno) e contenere quella sensazione uditiva sgradevole e fastidiosa prodotta da uno stato generale d'insoddisfazione verso l'ambiente acustico.

La buona ricezione è dunque legata alla presenza di un sufficiente livello sonoro nell'ambiente e alla percezione ottimale delle onde sonore dirette e riflesse, sia per quanto riguarda la loro composizione in frequenza, sia per quanto riguarda gli sfasamenti temporali che la caratterizzano.

In particolare, il contributo delle onde riflesse deve essere tale da instaurare una situazione favorevole di compromesso, in modo che possano contribuire al rinforzo del livello sonoro diretto, senza che una durata troppo lunga della *coda sonora* mascheri i segnali successivi. In questo caso, il tempo di riverberazione resta quindi un parametro oggettivo molto utile per valutare la buona ricezione in un ambiente.

Una buona ricezione

Per ottenere una buona ricezione in un ambiente destinato all'ascolto della parola si fa riferimento ad alcuni parametri; i principali sono l'adeguato livello sonoro (L_p), la sua uniformità spaziale e il

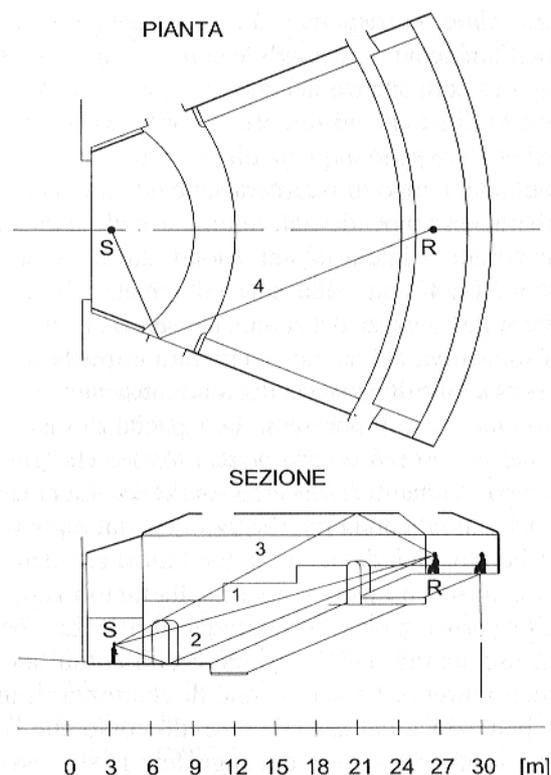
contenimento temporale della riverberazione sonora, valutato attraverso il valore assunto dal tempo di riverberazione (T).

Com'è noto, il valore del livello sonoro è legato alla potenza sonora della sorgente, alla sua direttività, alla distanza fra sorgente e ricevitore e all'assorbimento acustico totale dell'ambiente.

Il suono diretto, pur riducendosi d'intensità in funzione della distanza dalla sorgente, viene nel contempo integrato dalle riflessioni provenienti dalle superfici delimitanti il locale.

Nel suono riverberato è importante distinguere le prime riflessioni, che giungono all'orecchio dell'ascoltatore entro poche decine di millisecondi dopo il suono diretto e che contribuiscono a costituire il segnale utile, migliorando la chiarezza e nitidezza del segnale ricevuto. In questo caso, la differenza di percorso rispetto al suono diretto deve essere inferiore a 10 metri. Le successive riflessioni sono, invece, negative al fine dell'ascolto, poiché hanno un effetto mascherante.

A tal fine, è importante favorire la propagazione dei suoni dovuti alle prime riflessioni, anche per mezzo di opportuni "specchi acustici" posti vicino all'oratore e orientati verso il fondo della sala, mentre è opportuno ostacolare la propagazione dovuta alle riflessioni successive, tramite un adeguato assorbimento delle superfici dell'ambiente interessate.



<i>Differenza di percorso (metri)</i>	<i>Condizione di ascolto</i>
< 8,5	eccellente per parola e musica
da 8,5 a 12	buona per la parola, povero per la musica
da 12 a 15	al limite dell'accettabile
da 15 a 21	negativa
> 21	eco intollerabile, se di intensità sufficiente

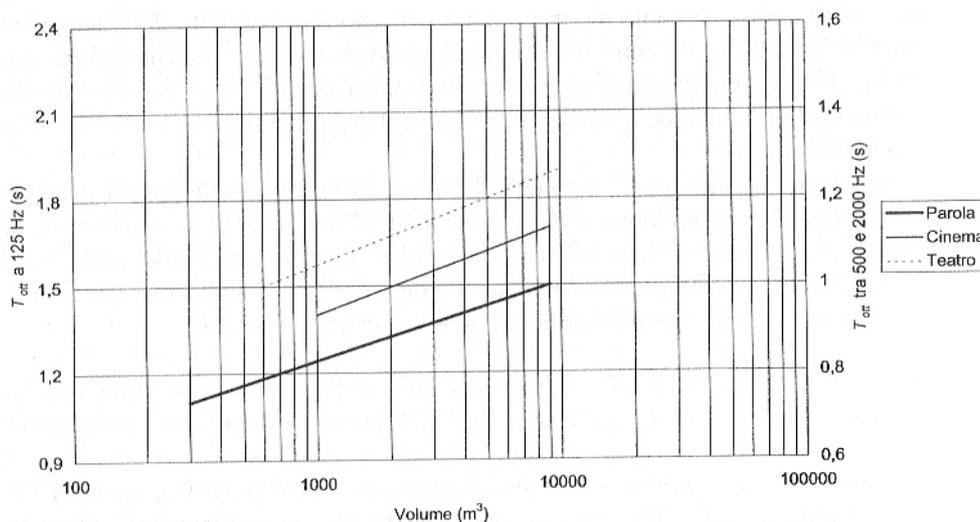
Gli effetti del suono riverberato sulla qualità dell'ascolto si valutano per mezzo della determinazione del tempo di riverberazione T_{60} .

Il fenomeno della riverberazione presenta aspetti positivi e negativi. Infatti, se un certo valore del tempo di riverberazione aiuta a rinforzare il suono diretto e quindi a migliorarne l'ascolto, per contro, un valore eccessivo della coda sonora ne compromette la qualità, rendendo il suono impastato. Ottenere valori ottimali del tempo di riverberazione rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

In generale, per ambienti destinati all'ascolto della parola i valori ideali di T_{60} sono più brevi rispetto a quelli per le sale destinate all'ascolto della musica, in quanto la diffusione musicale richiede una maggiore enfattizzazione dell'effetto spaziale.

Inoltre, è necessario considerare che ad un incremento del volume dell'ambiente corrisponde un aumento del tempo di riverberazione ottimale. In questo caso, è necessario compromettere lievemente l'ascolto a favore di un più elevato valore del livello sonoro.

A tale scopo, sono stati costruiti dei diagrammi che consentono di determinare il tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume e della destinazione d'uso dell'ambiente come quello di seguito riportato.



Valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume dell'ambiente e della sua destinazione d'uso

In alternativa, è possibile adottare la seguente relazione empirica, valida per ambienti destinati all'ascolto della parola, che fornisce il tempo di riverberazione ottimale alla frequenza di 500 Hz.

$$T_{ott,500Hz} = 0,5 + 10^{-4}V \quad (s)$$

Criteri di progettazione acustica

Al fine di poter improntare correttamente la progettazione acustica di una sala è necessario tener conto di alcuni importanti aspetti, quali:

- la *forma*;
- il *trattamento acustico*.

La scelta della *forma* ha un'importanza fondamentale perché è necessario ridurre al minimo gli echi o la diffusione irregolare del suono. Sono, pertanto, da preferire le forme compatte in alternativa a quelle irregolari, specie se presentano uno sviluppo longitudinale molto allungato, poiché si creerebbero zone d'ombra acustica.

Il *trattamento acustico* consiste nel calcolare l'assorbimento acustico globale che deve avere un ambiente per assicurare una buona diffusione del suono riverberato, scegliendo il tipo di materiale fonoassorbente da impiegare e determinando la quantità di unità fonoassorbenti da mettere in opera al fine di conferire all'assorbimento globale il valore ottimale.

Per quanto riguarda il trattamento acustico dell'ambiente, il calcolo dell'assorbimento globale deve tener conto di due esigenze:

- *riconduurre il valore del tempo di riverbero al valore ottimale in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente;*
- *assicurare in tutti i punti della sala un livello di pressione sonora udibile dai fruitori.*

Queste due esigenze offrono, tuttavia, un elemento di contrasto determinato dal fatto che all'aumentare dell'assorbimento globale si riduce sia il valore del tempo di riverbero sia il livello di pressione sonora al ricettore. Pertanto, se si desidera mantenere un valore accettabile del livello sonoro di ascolto, all'aumentare del volume dell'ambiente è necessario "accettare" un aumento del valore del tempo di riverbero.

Ciò considerato, al fine di ottimizzare la propagazione del suono, la progettazione di un ambiente acusticamente corretto può essere affrontata attraverso un *metodo sperimentale* o uno *analitico*.

Il *metodo sperimentale* si avvale delle seguenti fasi:

- rilievo acustico in loco (UNI EN ISO 140);
- analisi dei dati;
- considerazioni sul tempo di riverberazione rilevato e determinazione delle unità assorbenti prima del trattamento;
- ricerca del tempo di riverberazione ottimale e calcolo delle unità assorbenti per realizzarlo;
- scelta del tipo di materiale;
- disposizione del materiale.

Il *metodo analitico* è sviluppato attraverso:

- analisi dettagliata della natura delle superfici e della loro estensione;
- ricerca dei coefficienti di assorbimento acustico, da tabelle bibliografiche o da schede tecniche del materiale, e determinazione delle unità assorbenti prima del trattamento;

- calcolo del tempo di riverberazione (T_{60}) teorico;
- ricerca del tempo di riverberazione ottimale in funzione dell'uso e del volume dell'ambiente e calcolo delle unità assorbenti per realizzarlo;
- scelta del tipo di materiale;
- disposizione del materiale.

Realizzare un ambiente confortevole richiede anche una specifica conoscenza dell'esigenza per la quale tale ambiente è stato realizzato. In particolare, una sala da concerto ha esigenze notevolmente differenti rispetto ad un ambiente abitato, così come un sala per riunioni si differenzia da una stanza d'ospedale.

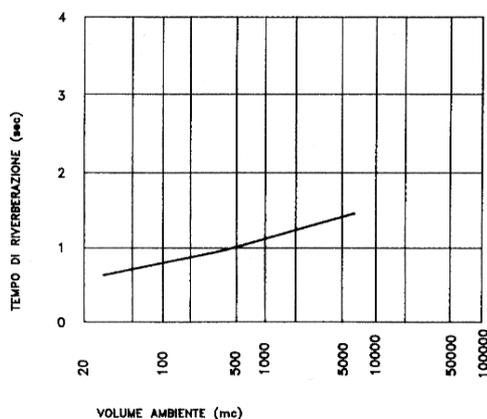
Di seguito è riportata qualche utile indicazione per garantire un adeguato utilizzo di alcuni ambienti comuni.

Abitazioni

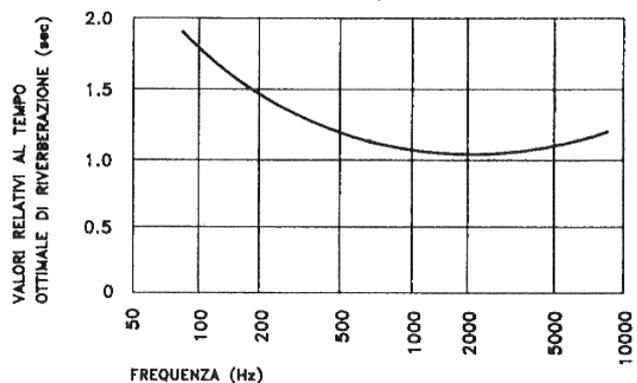
Per quanto riguarda le abitazioni, non v'è ancora una norma di settore che indichi i requisiti di fonoassorbimento da garantire all'atto della progettazione o della costruzione di un edificio. Tuttavia, la bibliografia di settore raccomanda un tempo di riverberazione (T_{60}) minore di 1 s. negli ambienti dove si svolge la normale vita di relazione, quali salotto, sala da pranzo, ecc..

Scuole

Diversamente a quanto visto per le abitazioni, i requisiti acustici relativi agli edifici scolastici sono definiti dal D.M. 18 dicembre 1975 recante "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica", il quale stabilisce i criteri inerenti sia l'isolamento acustico fra ambienti e verso l'esterno, sia le caratteristiche acustiche interne di aule e palestre.



Tempo di riverberazione dipendente dal volume



Tempo di riverberazione dipendente dalla frequenza

Ospedali, case di cura e di riposo

Per motivi principalmente igienici, negli ambienti sanitari le pareti ed i pavimenti sono rivestiti spesso con materiali molto riflettenti. In questi casi, l'eccessiva riverberazione può causare livelli sonori ambientali elevati. Pertanto, un adeguato intervento di fonoassorbimento può essere necessario al fine di rendere più accettabile la degenza ospedaliera o il soggiorno in strutture di ricovero, oltreché garantire un, seppur minimo, grado di riservatezza di cui spesso è lamenta la mancanza.

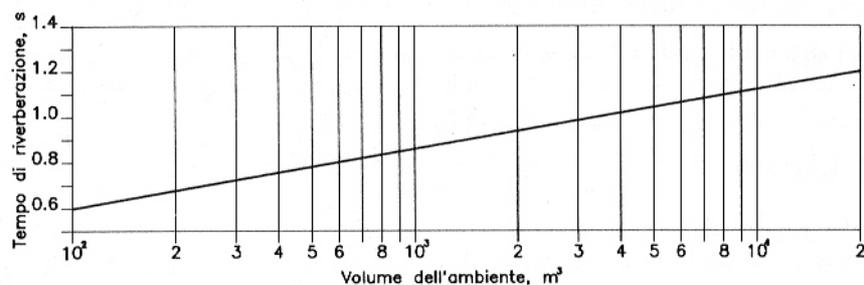
Tali aspetti possono essere risolti realizzando ambienti non troppo alti, allo scopo di ridurre le superfici laterali riflettenti, e rivestendo il soffitto con materiali fonoassorbenti adeguati a mantenere inalterate nel tempo le loro caratteristiche acustiche, oltre che d'igiene e di manutenzione.

Sale riunioni e biblioteche

Requisito essenziale di questi ambienti è quello di mantenere basso il livello sonoro di fondo. In particolare, nelle biblioteche quest'obiettivo talvolta è di difficile attuazione, poiché il colloquio di alcune persone può disturbare le altre, specie quando i tavoli di lettura sono molto ravvicinati fra loro.

In questi casi, è utile realizzare il rivestimento fonoassorbente del soffitto. Se ciò non basta, è necessario inserire degli schermi (fissi o mobili) di limitata altezza.

Per le sale riunioni vengono generalmente consigliati tempi di riverberazione ottimali, in relazione al volume della sala. A tale scopo può essere impiegato il diagramma di seguito riportato.



Valori ottimali del tempo di riverberazione a 500 Hz per sale riunioni

Materiali e indicazione di posa

I materiali assorbenti sono largamente utilizzati nel trattamento acustico degli ambienti per ridurre l'energia sonora riverberata. Il loro corretto impiego permette il controllo del tempo di riverberazione, oltreché la riduzione del livello di pressione sonora presente all'interno dell'ambiente. Infatti, assorbire l'energia sonora emessa è uno dei metodi più efficaci per ridurre la propagazione del suono all'interno di spazi chiusi, quali condotte, cabine insonorizzate, ambienti di lavoro industriale, ecc..

I materiali assorbenti trovano applicazione anche in altri campi, ad esempio nelle barriere antirumore, poste lungo strade e ferrovie, allo scopo di contenere la riflessione del suono sulla loro superficie.

La scelta dei criteri e dei materiali da adottare per risolvere un problema di fonoassorbimento è legata a diversi fattori, non solo di tipo acustico, quali:

- *durata* (i materiali devono conservare a lungo le loro caratteristiche, poiché il deterioramento dovuto all'umidità, ai fumi e alle polveri può influenzare sia l'aspetto che le caratteristiche fisiche);
- *combustibilità* (in quasi tutte le applicazioni è richiesta l'inflammabilità o, perlomeno, la capacità di autoestinzione);
- *lavabilità* (necessaria per alcuni tipi di materiali impiegati, ad esempio, nel rivestimento delle pareti laterali);
- *pittura* (utile per poter rinnovare l'aspetto estetico qualora logorato dal tempo. Tale caratteristica deve essere eventualmente specificata dal costruttore);
- *resistenza meccanica* (le superfici che possono venire a contatto devono garantire un'adeguata robustezza superficiale. È il caso tipico delle pareti laterali delle sale mensa o degli ambienti di lavoro);
- *estetica* (favorire la scelta di materiali adatti all'ambiente nel quale sono installati allo scopo di conferire un aspetto gradevole);
- *coefficiente di assorbimento acustico* (da ricercare in dati di bibliografia, meglio se forniti direttamente dal produttore attraverso la scheda tecnica del materiale, nel qual caso è bene siano riportati i valori di assorbimento nelle bande d'ottava comprese tra 125 e 4.000 Hz).

Controsoffitti fonoassorbenti

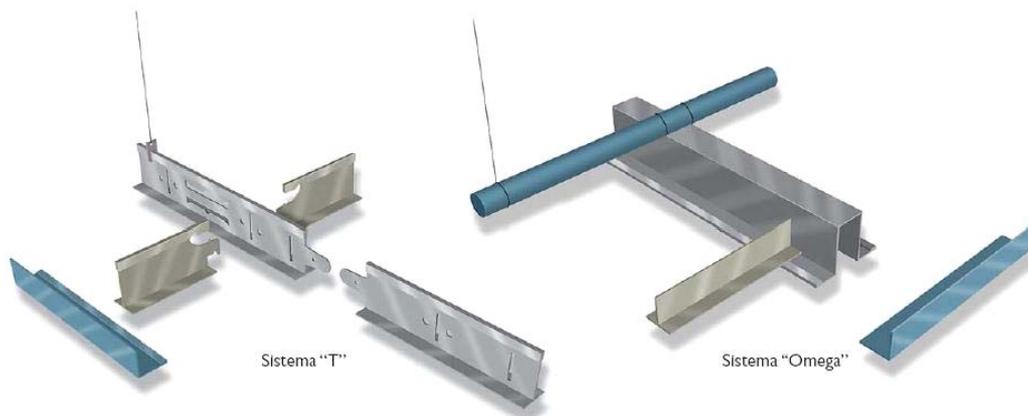
Il sistema maggiormente impiegato per la correzione acustica di un ambiente è la realizzazione di un controsoffitto fonoassorbente. Tale soluzione, si può dire abbia ormai soppiantato qualsiasi altro tipo di intervento (tendaggi, rivestimento delle pareti, ecc.), poiché, nella maggior parte dei casi, permette, da sola, di ottenere un adeguato confort acustico.

Il successo di questa soluzione è anche da ricercare negli innumerevoli vantaggi offerti dal poter operare un intervento su una sola delle superfici di un ambiente, sufficientemente ampia e poco esposta ad usura (urti meccanici e imbrattamento).

Per la costruzione dei controsoffitti sono impiegati, generalmente, pannelli in alluminio, in PVC, in gesso, lana di vetro con superficie a vista trattata o in fibre minerali. Questi materiali si prestano bene a trattamenti acustici di uffici, sale e locali pubblici.

L'orditura portante dei pannelli, può essere a vista o a incasso, ed è costituita da dei tralicci di profilati in lamiera zincata a maglie rettangolari o quadrate.

L'orditura è sospesa al soffitto per mezzo di tiranti metallici o di staffe rigide regolabili con viti o a mezzo di molla interposta. Quest'ultima soluzione è da preferire, in quanto evita il collegamento solitale fra solaio e controsoffitto, eliminando eventuali trasmissioni di rumore per via strutturale.



Un controsoffitto può avere un comportamento acustico combinato, ossia può contenere l'energia sonora presente all'interno di un ambiente per assorbimento (dovuto al materiale poroso di cui è costituito il pannello), per risonanza (legato alla rigidità del pannello) e per risonanza delle cavità (dovuta alla foratura dei pannelli e al volume dell'intercapedine).

Un aspetto molto importante da considerare è la distanza tra controsoffitto e intradosso del solaio, poiché all'aumentare di questa la frequenza di risonanza del sistema pannello-intercapedine si sposta verso il basso, causando un incremento dell'assorbimento delle basse frequenze.

L'effetto finale può essere anche gradevole, giacché è possibile intervenire sia sulle forme sia sui colori al fine di conferire all'ambiente un piacevole gusto estetico, come dimostrano alcune applicazioni di seguito riportate.



Corridoio



Atrio di un ospedale

**Aula didattica****Piscina coperta**

Si ricorda, infine, che negli interventi di correzione acustica è di primaria importanza conoscere l'uso cui è destinato quel determinato ambiente. Come più volte rimarcato nei capitoli precedenti, le qualità acustiche di una sala riunioni sono assai differenti da quelle di una sala da concerto. Nello specifico, è necessario che il progettista non solo abbia ben note le leggi fisiche di propagazione del suono negli ambienti chiusi ma deve conoscere, inoltre, quali sono le qualità che fanno apprezzare l'ascolto della musica. Il segnale musicale prodotto da un'orchestra, ad esempio, è composto da suoni che variano con continuità e con discontinuità nel tempo, con cadenze ritmiche e non, con variazioni continue d'altezza, di timbro e d'intensità, caratteristiche queste che sono organizzate armoniosamente fra loro. Nel punto d'ascolto è necessario, quindi, che la mescolanza di onde dirette e riflesse determinino una buona qualità del suono percepito.

Ciò considerato, in siffatti e specifici ambiti di applicazione, è richiesto l'ausilio di figure tecniche specialistiche che sappiano valutare con competenza le diverse e complesse problematiche derivanti da precise esigenze.

Appendice

Coefficienti di assorbimento acustico di alcuni materiali

MATERIALE	Spessore mm (compreso eventuale intercapedine)	FREQUENZA					
		125	250	500	1000	2000	4000
a) Superfici interne correnti							
Intonaco normale	15	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08
Muratura di mattoni		0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Calestruzzo		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Lastra di vetro di finestra	2	0,30	0,20	0,15	0,10	0,07	0,04
Lastra di vetro di infisso	4	0,35	0,25	0,20	0,10	0,05	0,05
Lastra di vetro di infisso	6	0,15	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Lastra di vetro aderente a parete		0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Marmo o piastrelle vetrificate		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Bocchette di ventilazione		0,15	0,20	0,50	0,35	0,30	0,20
b) Rivestimenti di pareti e soffitti							
Soffitto sospeso in gesso liscio		0,25	0,20	0,10	0,07	0,05	0,10
Intonaco acustico (valori medi)	15	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Tende leggere appese a pieghe		0,05	0,06	0,10	0,18	0,30	0,40
Tende pesanti appese a pieghe		0,08	0,10	0,15	0,25	0,40	0,50
Pannelli di fibre di vetro o di roccia (media densità)	25	0,10	0,35	0,60	0,70	0,75	0,80
	50	0,20	0,45	0,65	0,75	0,80	0,80
	100	0,45	0,75	0,80	0,85	0,85	0,90
Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte	25	0,15	0,30	0,60	0,75	0,85	0,90
	50	0,25	0,50	0,85	0,95	0,90	0,90
	100	0,50	0,70	0,95	0,95	0,98	0,98
Lastra di legno di 6 mm, su listelli, con intercapedine d'aria di 75 mm e pannello in fibra di vetro di 25 mm	81	0,60	0,50	0,10	0,09	0,09	0,09
Lastra di legno di 12 mm su listelli, con intercapedine d'aria di 60 mm, e pannello in fibra di vetro di 60 mm	72	0,30	0,20	0,15	0,10	0,15	0,10
Masonite di 3 mm, con rivestimento in feltro di 50 mm	53	0,90	0,45	0,25	0,15	0,10	0,10
c) Pavimenti							
Battuto di cemento o marmette		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Legno (parquet)	10	0,04	0,05	0,07	0,10	0,10	0,10
Gomma (piastrelle)	6	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05
Moquette a pelo raso su feltro	6	0,05	0,05	0,10	0,20	0,45	0,65
Moquette a pelo medio su gomma piuma	10	0,05	0,10	0,30	0,50	0,65	0,70
Tappeti (valori medi)		0,10	0,13	0,20	0,30	0,25	0,25
Linoleum		0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
d) Sedili e persone (valori in m² di unità di assorbimento per capo)							
Sedia in legno o parzialmente imbottita non occupata		0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,10
Sedia in legno parzialmente imbottita occupata		0,15	0,25	0,40	0,40	0,45	0,40
Poltroncina imbottita non occupata		0,10	0,20	0,30	0,30	0,30	0,35
Poltroncina imbottita occupata		0,20	0,40	0,45	0,45	0,50	0,45
Persona seduta o in piedi		0,15	0,30	0,40	0,40	0,45	0,40

Bibliografia

Giuseppe Elia e Guido Geppetti, *Progettazione acustica di edifici civili e industriali*, La Nuova Italia Scientifica, 1994;

Raffaele Gigante, 1996, *Rumore ed isolamento acustico*, Manuale di progettazione con guida all'applicazione della Legge quadro sull'inquinamento acustico, Dario Flaccovio Editore, 1996;

Renato Spagnolo, *Manuale di acustica applicata*, Utet Libreria, 2001;

Claudio Martorana e Simona Becherini, *Assorbimento e isolamento acustico negli edifici*, Maggioli Editore, 2004.